

Schlussbericht des Vorhabens

Technologien zur Erhöhung des thermischen und akustischen Passagierkomforts bei Einsatz von aktiven Lining-Modulen

Zuwendungsempfänger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Linder Höhe, 51147 Köln	FKZ 20K1301D
Autoren Dr. Malte Misol ¹⁾ (Teilprojekt 1) Dr. Johannes Bosbach ²⁾ (Teilprojekt 2, Projektkoordination) Tobias Dehne ²⁾ (Teilprojekt 3) ¹⁾ Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, DLR Braunschweig ²⁾ Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen	
Laufzeit des Vorhabens	01.07.2014 – 31.03.2018
Datum	31.03.2018
Empty box for additional information	

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 20K1301D gefördert. Die Form des Berichtes entspricht den Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (NKBF98). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Abkürzungsverzeichnis.....	3
1 Kurzdarstellung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.1.1 TP1 – „Smart active Lining Module“	5
1.1.2 TP2 – „Smart Ventilation“	6
1.1.3 TP3 – Beheizbarer Kabinenluftauslass.....	7
1.2 Voraussetzungen des Vorhabens.....	7
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	8
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	10
1.5 Zusammenarbeit.....	14
2 Eingehende Darstellung	16
2.1 Erzielte Ergebnisse	16
2.1.1 TP1 – „Smart active Lining Module“	16
2.1.2 TP2 – „Smart Ventilation“	24
2.1.3 TP3 – Beheizbarer Kabinenluftauslass.....	38
2.2 Voraussichtlicher Nutzen.....	42
2.3 Fortschritte bei anderen Stellen	43
2.4 Veröffentlichungen und Vorträge	43
2.5 Erfindungsmeldungen	44
2.6 Abschlussarbeiten	44
2.7 Literaturverzeichnis.....	45

Abkürzungsverzeichnis

ANC	„Active Noise Control“
AP	Arbeitspaket
ASAC	„Active Structural Acoustic Control“
ATB	Akustischer Transmissionsprüfstand Braunschweig
ATRA	„Advanced Technology Research Aircraft“ des DLR
AVC	„Active Vibration Control“
CAD	„Computer Aided Design“
CCDV	Deckenseitige Verdrängungslüftung (engl. „Ceiling Based Cabin Displacement Ventilation“)
CCDV-X%-Y%	Hybride Belüftung, wobei X% der Zuluft über die CCDV und Y% der Zuluft über die CDV-Auslässe zugeführt wird. Die Luft tritt durch die invers betriebenen lateralen Auslässe wieder aus.
CDV	Kabinen Quelllüftung (engl. „Cabin Displacement Ventilation“)
CFD	„Computational Fluid Dynamics“
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DAC	Firma DIEHL Aircabin
DAs	Firma DIEHL Aerosystems
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Do 728	Dornier 728 Versuchsträger des DLR Göttingen
DV	Verdrängungslüftung (engl. „Displacement Ventilation“)
ECS	„Environmental Control System“
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methoden
HRE	Wärmeabstragseffizienz (engl. „Heat Removal Efficiency“)
IATA	„International Air Transport Association“
IR	Infrarot
KLA	Kabinen Luftauslass
LSF	Lautsprecherfeld des DLR-Instituts FA
LUFO	Luftfahrtforschungsprogramm des Bundes
MV	Mischlüftung (engl. „Mixing Ventilation“)
PA	System für Durchsagen an die Passagiere (engl. „Passenger Announcement“)
PAX	Passagier
PIV	Particle Image Velocimetry
PLF	„Passenger Load Factor“
RANS	„Reynolds Averaged Navier Stokes“
SLDV	„Scanning Doppler Laser Vibrometer“
TL	Schalldämmmaß (engl. „Transmission Loss“)
TP	Teilprojekt
TPD	Thermische Passagiermodelle (engl. „Thermal Passenger Dummies“)
TRL	Technologiereifegrad (engl. „Technology Readiness Level“)
URANS	„Unsteady RANS“

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die experimentelle Demonstration von zwei innovativen Technologien zur Erhöhung des akustischen und thermischen Passagierkomforts. Hierbei handelt es sich um ein aktives Lining-Modul mit erhöhter Schalldämmung zur Reduzierung des Schalleintrags in die Flugzeugkabine einerseits und um eine bedarfsgesteuerte Klimazonenautomatik zur Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Homogenität der Temperaturverteilung andererseits. Die Arbeiten bauten auf den im Rahmen des Projektes DLR₄DIANA (FKZ 20K1101E) initiierten Untersuchungen und Ergebnissen auf [1].

Es sollte ein aktives Lining-Modul mit, im Vergleich zum passiv gedämmten Serienbauteil, erhöhter Schalldämmung ausgelegt und experimentell realisiert werden. Der Nachweis der verbesserten Schalldämmung sollte unter realitätsnahen Bedingungen im akustischen Transmissions-Prüfstand erbracht werden. Mit Hilfe des, im Rahmen von DLR₄DIANA entwickelten, dynamischen Finite-Elemente-Simulationsmodells (FE-Modell) eines realitätsnahen Flugzeugrumpfabchnitts sollten Simulationsrechnungen zur Definition der Aktuatorik und Sensorik des aktiven Systems durchgeführt werden. Weiterhin sollte die Simulation eine Abschätzung der erreichbaren Schalldämmung des aktiven Lining-Moduls (im Folgenden Smart Lining) liefern. Eine anschließende experimentelle Realisierung im akustischen Transmissionsprüfstand sollte den Konzeptnachweis für die Smart-Lining-Technologie erbringen.

Neuere wissenschaftliche Ergebnisse des Antragsstellers, welche unter anderem auch im Projekt DLR₄SINTEG (FKZ 20Ko806D) erarbeitet und dokumentiert worden sind, hatten vor der Antragstellung bereits das große Potenzial des Smart Linings am Beispiel einer vereinfachten Seitenwandstruktur nachgewiesen [2]. Gemeinsame Zielsetzung des Antragsstellers und des Industriepartners Diehl Aircabin (DAc) war es daher, die Technologie voranzutreiben und den erfolgreichen Konzeptnachweis aus DLR₄SINTEG auf ein Seitenwandpaneel mit größeren Dimensionen und komplexerer Geometrie (insbesondere mit zwei Fenstereinheiten) zu übertragen.

Weiterhin sollten die aerodynamischen Möglichkeiten für eine vollautomatische „Wohlfühlkabine“, die ihre Kühlleistung lokal an die tatsächlich vorhandenen Wärmelasten anpasst und bei höherem Passagierkomfort potenziell energieeffizienter arbeitet als konventionelle Systeme, eingehend geprüft werden. Ziel der Technologie ist es, die räumliche Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung der Kabinenluft unter stationären und instationären Bedingungen zu verbessern. Aufbauend auf den in DLR₄DIANA begonnenen Untersuchungen sollten dazu weitere wichtige Fragestellungen bezüglich der Reaktion der Belüftungssysteme Mischlüftung (MV), Kabinenquelllüftung (CDV) sowie deckenseitige Verdrängungslüftung (CCDV) auf lokale und ungleichmäßig verteilte Wärmelasten adressiert werden, um schließlich zu einer Bewertung der verschiedenen Belüftungskonzepte hinsichtlich der Anwendbarkeit von „Smart Ventilation“ zu gelangen. Hauptziel des Projektes war die Demonstration der Machbarkeit einer lokalen Temperaturregelung zwecks Erzielung einer räumlich homogenen und zeitlich konstanten Temperaturverteilung bei Mischlüftung an einem Demonstrator (Do728) [3]. Die technische Umsetzung sollte mittels eines leichten, schnell

beheizbaren Luftauslasses erfolgen, der im Rahmen dieses Vorhabens gemeinsam mit DAC entwickelt und strömungstechnisch qualifiziert wurde.

Mit der Bearbeitung der beantragten Forschungsthemen konnten die wissenschaftlichen Zielsetzungen des Antragsstellers in idealer Weise mit dem wirtschaftlichen Interesse des Industriepartners an zwei innovativen Produkten verknüpft werden.

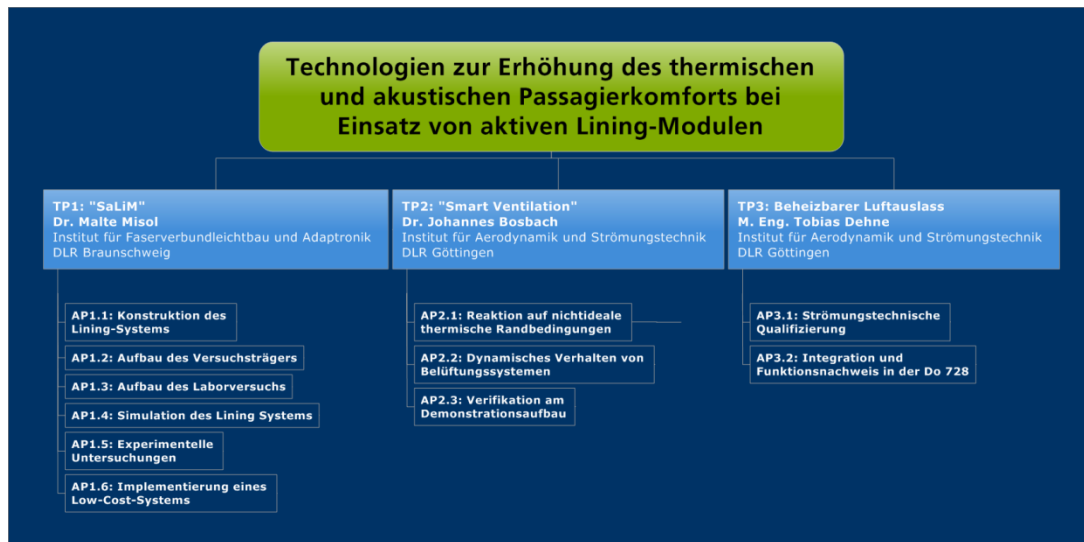


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur des Vorhabens.

Das Vorhaben gliederte sich in drei Teilprojekte, deren jeweilige Zielsetzung im Folgenden im Detail beschrieben wird.

1.1.1 TP1 – „Smart active Lining Module“

Die übergeordnete Aufgabestellung des Projekts bestand in der Realisierung eines modularen, aktiven Seitenwandpanels, welches fähig ist, den Innenlärm in Flugzeugen auf leichtbaukonforme Weise zu reduzieren und ggf. noch Zusatzfunktionen wie z.B. Passagierdurchsagen zu übernehmen. Das grundsätzliche Schema eines solchen sog. Smart-Lining-Moduls ist in Abbildung 2 zu sehen.

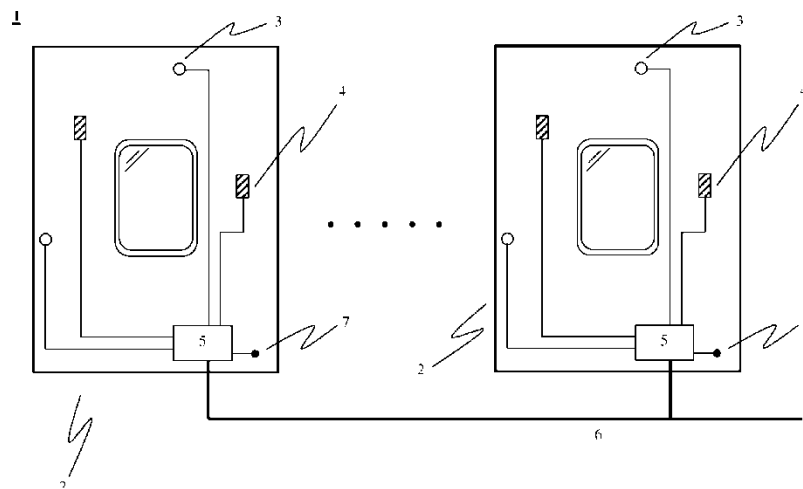


Abbildung 2: Grundprinzip eines Smart Linings im Verbund mit weiteren in der Flugzeugkabine verbauten Modulen (siehe: Patent „Schalldämmungssystem“ [12]).

Jedes Modul (2) ist autonom und benötigt lediglich eine Energieversorgung (6). Die Aktuatoren (4) und Sensoren (3) sind mit einer Signalverarbeitungseinheit (5) verbunden. Diese besitzt eine drahtlose Kommunikationseinrichtung (7), um mit benachbarten Smart Linings zu kommunizieren.

Die beantragten Forschungsarbeiten gliederten sich in einen simulationsbasierten und einen experimentellen Teil. Im Rahmen der Simulationsarbeiten sollte das in DLR4DIANA entwickelte dynamische FE-Simulationsmodell des Lining-Systems (Rumpfschale mit angekoppeltem Lining) anhand von Messdaten angepasst und verifiziert werden. Das Modell sollte als verifiziert gelten, wenn die Abweichungen zwischen simuliertem und gemessenem Schalldämmmaß unter Berücksichtigung der Messtoleranzen im Bereich ± 3 dB in Terzbändern liegen. Mit Hilfe des verifizierten Simulationsmodells und einer vorhandenen numerischen Auslegungstoolbox (ASAC-Prozesskette) sollte anschließend eine Platzierung der Aktuatorik und Sensorik für das Smart Lining abgeleitet werden. Der experimentelle Teil beinhaltete die Realisierung des aktiven Lining-Systems im akustischen Transmissionsprüfstand. Das aktive Lining-System besteht aus einer gekrümmten, mit Stringer und Spanten versteiften kohlenstofffaserverstärkten (CFK) Rumpfschale und dem Smart Lining. Die Vermessung des Schalldämmmaßes des Lining-Systems im passiven (Smart-Lining ist inaktiv) und aktivem (Smart-Lining ist aktiv) Fall sollte den Nachweis über die verbesserte akustische Wirksamkeit des Smart-Linings erbringen. Für den Frequenzbereich 50-500 Hz wurde eine Erhöhung der Schalldämmung von mindestens 3-6 dB(A) in Terzbändern (relativ zum Serienbauteil) erwartet. Dies entspricht einer Verringerung der transmittierten Schallleistung um bis zu 75%.

Der Konzeptnachweis des Smart Linings unter realitätsnahen Laborbedingungen war das primäre technische Arbeitsziel des Teilprojekts 1. Wissenschaftliche Zielsetzungen waren die Stärkung der Kompetenzen des Antragsstellers im Bereich der numerischen Auslegung von aktiven Strukturen und deren experimentelle Vermessung und Bewertung unter realitätsnahen Laborbedingungen. Die Untersuchung eines Systems in der vorgesehenen Strukturkomplexität und Realitätsnähe war bisher weder national noch international wissenschaftlich dokumentiert worden. Insofern waren die beantragten Forschungsarbeiten mit der wissenschaftlichen Zielsetzung verbunden, neue Impulse im Bereich der aktiven Struktur-Akustik-Regelung (ASAC) zu setzen und das wissenschaftliche Renommee des Antragsstellers zu befördern.

1.1.2 TP2 – „Smart Ventilation“

Ziel von TP2 war die Demonstration des „Smart Ventilation“ Prinzips, d.h. einer multi-zonalen Temperaturregelung mit dem Ergebnis einer deutlichen Temperatur-Homogenisierung, am Do 728 Versuchsträger mit den in TP3 entwickelten Kabinen-Luftauslässen (KLA) für den Fall der Mischlüftung. Es wurden maximale Abweichungen der lokalen Lufttemperaturen zwischen gleichen Sitzplätzen verschiedener Sitzreihen von weniger als $\pm 0,5$ °C vom Mittelwert bei Antwortzeiten von etwa drei Luftwechselraten angestrebt. Um dies zu ermöglichen, war zunächst mit einem einzelnen KLA die Ausbreitung von Wärmelasten in der Zuluft bei Mischlüftung zu charakterisieren. Um die Möglichkeit der Anwendung bei alternativen Belüftungskonzepten in zukünftigen Projekten zu klären, zielten die Arbeiten darüber hinaus auf eine weitere Charakterisierung des dynamischen Verhaltens der Belüftungsverfahren MV, CDV und CCDV. Das Teilziel dieser Arbeiten war die Bewertung der verschiedenen Verfahren hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit für Smart Ventilation.

Konkret sollte zusätzlich zu den bereits in DLR4DIANA geplanten bzw. durchgeführten Untersuchungen

1. die Ausbreitung von Impuls- und Wärmequellen auch bei dem wichtigen Fall der CDV charakterisiert werden
2. die Ausbreitung von Wärmequellen in der Zuluft unter Benutzung der in TP2 entwickelten Auslässe bei MV bestimmt werden
3. Die Reaktion von MV, CDV und CCDV gegenüber ungleichmäßig verteilten Wärmelasten in der Kabine ermittelt werden
4. Konzepte zur Ableitung lokaler, zeitlich veränderlicher Wärmelasten erarbeitet werden
5. Die Machbarkeit an einem Demonstrationsaufbau (Do 728) für MV verifiziert werden.

1.1.3 TP3 – Beheizbarer Kabinenluftauslass

Ziel war die Entwicklung eines leichten, schnell beheizbaren Kabinenluftauslasses und dessen Integration in den Do 728 Versuchsträger zur technischen Umsetzung und Demonstration des „Smart Ventilation“ Prinzips in TP2. Eine Steuerung der Zulufttemperatur direkt in den Luftauslässen sollte dabei eine Manipulation der Kabinentemperaturverteilung innerhalb weniger Luftwechselraten erlauben. Das Ziel sollte durch Aufteilung des Teilprojektes in komplementäre Arbeitsanteile zwischen DLR und dem Projektpartner DAC erreicht werden. DAC übernahm dabei die Auslegung und Entwicklung des KLA, die Fertigung und Bereitstellung von Funktionsmustern sowie der endgültigen KLAS. Das DLR war für die strömungstechnische Charakterisierung der Funktionsmuster und des endgültigen KLA mittels Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldmessungen sowie für die Integration der finalen Luftauslässe in den Do 728 Versuchsträger verantwortlich.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Das Vorhaben war Teil des LUFO IV.5 Verbundprojektes SYLVIA („Synergetische Ansätze für neuartige Module, Monumente und Systeme von zukünftigen Flugzeug-Kabinen“) unter der Verbundführerschaft von DAC und baute auf einer erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen der Fa. DIEHL Aircabin (DAC) und dem DLR im Rahmen des LUFO IV.2 Verbundvorhabens SINTEG [2] sowie des LUFOIV.4 Verbundvorhabens DIANA [1] auf.

Basierend auf der Kompetenz des DLR in den Bereichen Entwicklung und Charakterisierung alternativer Belüftungskonzepte sowie der Entwicklung adaptronischer Systeme bot sich mit diesem Vorhaben die Gelegenheit für einen Ausbau der Zusammenarbeit zwischen dem DLR und dem Luftfahrt-Zulieferer. Mit der Expertise und Marktkompetenz der Fa. DAC bei der Herstellung moderner Kabineninterieurelemente und den im Rahmen der vorangegangenen Projekte gewonnenen Erfahrungen waren optimale Voraussetzungen für die Erforschung und Entwicklung neuer Kabinentechnologien gegeben.

Der Versuchsträger Do 728 [3] war zum Projektbeginn bereits mit drei verschiedenen Belüftungssystemen ausgestattet. Hierbei handelte es sich um das originale Mischlüftungssystem (MV), ein Kabinen-Quelllüftungssystem (CDV) sowie das im Rahmen von SINTEG entwickelte und unter stationären Bedingungen charakterisierte deckenseitige Verdrängungslüftungssystem (CCDV). Ferner war der Versuchsträger bereits mit einer umfangreichen Messtechnikinstallation einschließlich Passagiermodellen und einer schnell steuerbaren lokalen Wärmelast ausgerüstet, auf der im Rahmen dieses Vorhabens aufgebaut wurde.

Die Thematik eines adaptiven lärmreduzierten Linings (Smart Lining) wurde bereits im Rahmen des SINTEG Verbundvorhabens gemeinsam mit dem Industriepartner DAC verfolgt. Am Beispiel eines Lining-Bauteils ohne Fenstereinheiten (Spacer-Lining) wurde die akustische Wirksamkeit des Smart Linings experimentell im akustischen Transmissionsprüfstand Braunschweig (ATB) des DLR nachgewiesen. Das Smart-Lining Konzept erschien vielversprechend, der Nachweis für ein komplexes Serienbauteil mit Fenstereinheiten stand jedoch noch aus. Flankierend zu den Experimenten im ATB wurden dynamische Simulationen durchgeführt. Im Rahmen von SINTEG wurden daher Kompetenzen in den Bereichen Simulation und Vermessung von Lining-Bauteilen aufgebaut und die Basis für eine erfolgreiche Fortführung der Arbeiten gemeinsam mit DAC im Rahmen von DIANA gelegt. Im Rahmen von DIANA [1] wurde ein parametrisches FE-Modell eines Doppelschalensystems erstellt. Es konnte eine Teilvalidierung anhand von Messdaten für ein Airbus-A350-Vorserienbauteil durchgeführt werden. Dazu fanden Messungen im akustischen Transmissionsprüfstand (ATB) statt. Durch einen Vergleich der in einem anderen Transmissionsprüfstand gemessenen Schalldämmung konnte zudem sowohl die Messumgebung ATB und die verwendete Messkette als auch das FE-Modell des Linings validiert werden. Die Validierung des Gesamtmodells anhand von Messdaten der finalen Einzelsysteme und des Doppelschalensystems sowie die Realisierung eines lärmreduzierten Smart Linings war nicht Bestandteil von DIANA.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

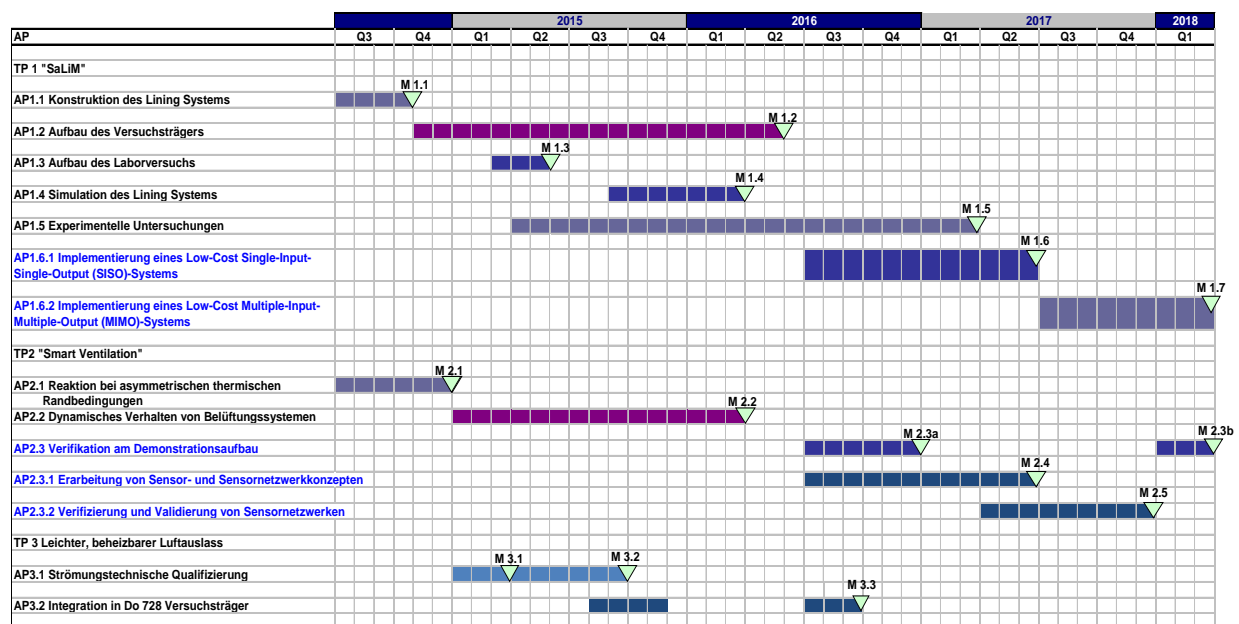


Abbildung 3: Arbeitsplan des Vorhabens.

Die Planung des Vorhabens ist in Abbildung 3 dargestellt. Die zugehörigen Meilensteine sind in Tabelle 1 erläutert. Der ursprüngliche Antrag hatte eine Laufzeit vom 01.07.2014 bis 31.03.2017 und umfasste die bis Ende Q1 2017 geplanten Arbeiten. Die in blau betitelten Arbeitspakete wurden im Rahmen eines Aufstockungsantrages der mit einer Laufzeitverlängerung verbunden war, nachträglich beantragt und genehmigt.

Teilprojekt 1 gliederte sich in die Arbeitspakete 1.1 bis 1.6 und umfasste die nachfolgend aufgeführten Arbeiten. Die Arbeitspakete AP1.1 und AP1.2 hatten den Entwurf und die Realisierung eines

flugzeugtypischen Doppelschalensystems bestehend aus einer Rumpfschale und einem angekoppelten Lining zur Aufgabe. Für diesen Versuchsträger erfolgte in AP1.3 der Aufbau eines Laborversuchs in einem akustischen Transmissionsprüfstand. Das Arbeitspaket AP1.4 hatte die Modellierung und Simulation des realisierten Doppelschalensystems zur Aufgabe. Die Modellierung und Simulation erfolgte schrittweise anhand der Teilsysteme Rumpf und Lining, so dass das Arbeitspaket bereits vor Beendigung von AP1.2 begonnen werden konnte. Analog zu AP1.4 erfolgten die Experimente in AP1.5 auf Teilsystembasis. Dazu wurden die Teilsysteme Rumpf und Lining sowie das gekoppelte System separat vermessen. Die Experimente endeten mit der Vermessung der Schallpegelreduktion des Smart Linings. Im Rahmen der Aufstockung kam das Arbeitspaket AP1.6 hinzu, welches die Realisierung und Vermessung des Smart Linings mit Low-Cost-Hardware zu Aufgabe hatte.

Tabelle 1: Liste und Bezeichnung der Meilensteine aus Abbildung 3. ¹⁾ Im Rahmen der Aufstockung neu hinzugekommene Meilensteine, ²⁾ im Rahmen der Aufstockung geänderte Meilensteine

M1.1	Konstruktion des Lining-Systems abgeschlossen
M1.2	Aufbau des Versuchsträgers abgeschlossen
M1.3	Aufbau des Laborversuchs abgeschlossen
M1.4	Simulation des Lining-Systems abgeschlossen
M1.5	Experimentelle Untersuchungen abgeschlossen
M1.6¹⁾	Low-Cost SISO-System erfolgreich an Teststruktur implementiert.
M1.7¹⁾	Low-Cost MIMO-System erfolgreich am Lining-System implementiert.
M2.1	Reaktion von MV, CDV und CCDV auf ungleichmäßig verteilte Wärmelasten charakterisiert
M2.2	Untersuchung des dynamischen Verhaltens verschiedener
M2.3a²⁾	Demonstrationsaufbau funktionsfähig
M2.3b²⁾	Verifizierung der „Smart Ventilation“
M2.4¹⁾	Sensornetzwerk mit reduzierter Sensoranzahl für die gesamte Kabine erarbeitet
M2.5¹⁾	Evaluation des Sensornetzwerkes mit reduzierter Sensoranzahl in gesamter Kabine
M3.1	Teststand einsatzbereit
M3.2	Strömungstechnische Qualifizierung des neu entwickelten Luftauslasses abgeschlossen
M3.3	Integration der beheizbaren Luftauslässe in den Do 728 Versuchsträger abgeschlossen

Das Teilprojekt 2 „Smart Ventilation“ hatte die Entwicklung und Demonstration einer Klimazonenautomatik zum Inhalt und ist in drei Arbeitspakete untergliedert. Gegenstand von AP2.1 „Reaktion auf nichtideale thermische Randbedingungen“ war die Untersuchung und Quantifizierung des Einflusses ungleichmäßig verteilter Wärmelasten auf das Verhalten verschiedener bewährter und neuartiger Belüftungsvarianten. AP2.2 „Dynamisches Verhalten von Belüftungssystemen“ hatte die Charakterisierung der Ausbreitung lokaler Wärmelasten sowie des Einflusses lokal veränderlicher Enthalpieströme auf das Kabinenklima bei CDV zum Inhalt. AP2.3 „Verifikation am Demonstrations-

aufbau“ zielte schließlich auf die Implementierung und experimentelle Validierung der Klimazonenautomatik im Do 728 Versuchsträger.

Nachdem die Bearbeitung zunächst planmäßig verlief, kristallisierte sich im Projektverlauf heraus, dass aufgrund der Komplexität der Strömungsvorgänge in der Kabine dem sicheren und eindeutigen Nachweis der lokalen Wärmelasten, insbesondere vor dem Hintergrund einer produktrealistischen Anzahl von Sensoren und Messkanälen, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Um diese Aspekte adressieren zu können, wurde eine Aufstockung um die Arbeitspakete 2.3.1 „Erarbeitung von Sensor- und Sensornetzwerkkonzepten“ und 2.3.2 „Verifizierung und Validierung von Sensornetzwerken“ mit den Meilensteinen M2.4 „Sensornetzwerk mit reduzierter Sensoranzahl für die gesamte Kabine erarbeitet“ und M2.5 „Evaluation des Sensornetzwerkes mit reduzierter Sensoranzahl in gesamter Kabine“ beantragt. Zu diesem Zweck wurde der ursprüngliche M2.3 aufgeteilt in die Meilensteine M2.3a „Demonstrationsaufbau funktionsfähig“ und M2.3b „Verifizierung der Smart Ventilation in gesamter Kabine“.

Das Teilprojekt 3 „Leichter, beheizbarer Luftauslass“ hatte die Entwicklung und Bereitstellung eines leichten, schnell heizbaren Kabinenluftauslasses zum Inhalt und gliederte sich in die Arbeitspakete AP3.1 „Strömungstechnische Qualifizierung“ und AP3.2 „Integration in den Do 728 Versuchsträger“. Die Untersuchungen der ersten Prototypen für den beheizbaren KLA ergaben, dass aufgrund der hohen Dreidimensionalität der Strömungsvorgänge innerhalb der Luftauslässe verbunden mit einer eingeschränkten Vermischung von kühler und warmer Luft eine homogene Temperierung der Kabinenluft nur mit sehr aufwändigen Verteilungen von Heizelementen innerhalb des Luftauslasses möglich gewesen wäre. Daher wurde das Konzept des intern beheizbaren Luftauslasses schließlich zugunsten vorgeschalteter, beheizbarer Zuluftstutzen mit System-inhärenter homogener Vermischung fallen gelassen. Diese fertigungstechnisch wesentlich einfachere Lösung hatte zudem den Vorteil eine Nachrüstlösung für die aktive Flotte darstellen zu können.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

1.4.1 TP1 – „Smart active Lining Module“

Eine wichtige Fragestellung für den Entwurf moderner Flugzeuge ist der zu erwartende Schallpegel (SPL) in der Kabine. Dieser sollte in der Regel möglichst niedrig sein, um die Gesundheit der Besatzung zu schützen und den Komfort der Fluggäste zu erhöhen. Ein vielversprechender Weg, den Kabinenschallpegel auch bei tiefen Frequenzen gewichtseffizient zu reduzieren ist die Anwendung von aktiven Systemen. Dazu wurden unterschiedliche Konzepte in der Vergangenheit wissenschaftlich untersucht und erprobt. Beim sog. Active Noise Control (ANC) werden Lautsprecher verwendet, um den Kabinenschallpegel mit Hilfe von Gegenschall (oder durch die Veränderung der Strahlungsimpedanz schallstrahlender Flächen) zu reduzieren. Initiale Ergebnisse von ANC im Flugzeug sind in [34] dokumentiert. Bei einer Blattfolgefrequenz von 88 Hz wurden Reduktionen des SPL um bis zu 13 dB erzielt. Ein alternativer Ansatz ist das sog. Active Structural Acoustic Control (ASAC), beim dem die Lautsprecher durch strukturelle Aktuatoren ersetzt werden und eine schallleistungsbezogene Metrik (d. h. die zu reduzierende Größe ist nicht mehr Schallpegel sondern die Schallleistung) verwendet wird. Initiale Ergebnisse von ASAC in Flugzeugen sind in [35] dokumentiert. In dieser Arbeit wird ein skaliertes Flugzeug-Rumpfmodell in einem reflexionsarmen Messraum aufgestellt und

mit einer Monopolschallquelle beschallt. Mit nur einem strukturellen Aktuator wurde eine starke Reduktion des Schallpegels innerhalb des Rumpfes erzielt. Diese und andere Arbeiten motivierten die Untersuchung eines aktiven Linings zur Reduktion des Schallpegels in der Kabine. Zu Projektbeginn existierten – abgesehen von den Arbeiten des DLR in den LuFo-Projekten SINTEG und SYLVIA – nur wenige andere Forschungsarbeiten in Bezug auf diese Thematik. Experimente von Lyle und Silcox [36] und von Tran und Mathur [37] ergaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse, was ein Grund dafür gewesen sein könnte, dass es insgesamt nur sehr wenige Arbeiten an aktiven Linings gab. In Lyle und Silcox wurden aktive Linings mit einer versteiften Rumpfschale gekoppelt. Die Linings selber waren einfache Sandwichbauteile, die sich über den gesamten Kreisbogen zwischen dem Fußboden (floor-to-floor) erstreckten. Die externe Anregung der Rumpftonne wurde mittels eines Lautsprechers realisiert. Die Rumpfschale wurde durch Endkappen akustisch abgedichtet. Der Versuch wurde in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt. Durch die Platzierung von piezoelektrischen Aktuatoren auf dem Lining und eine entsprechende Ansteuerung wurde eine globale Schallpegelreduktion von 5 dB im Inneren der Rumpftonne erreicht. Die Versuche von Tran und Mathur wurden an einem McDonnell Douglas DC-9 Flugzeug durchgeführt. Als Aktuatoren wurden 16 Piezoaktuatoren auf Linings im hinteren Bereich verwendet. 32 Mikrofone an den Kopfstützen und im Gang dienten als Fehlersensoren. In den Experimenten gelang lediglich die Reduktion des Schallpegels bei einer von acht Frequenzen. Dieses Ergebnis war unzureichend im Vergleich zu ANC-basierten Systemen oder ASAC-Systemen mit Aktuatoren auf der Rumpfstruktur (die am selben Flugzeug realisiert wurden). Die geringe akustische Wirksamkeit der aktiven Linings wurde von Tran und Mathur auf die unpassende Strukturmechanik der Linings, sub-optimale Aktuatorpositionen und Flankenübertragung des Störschalls zurückgeführt. Die Publikationen von Hirsch et al. [38, 39] dokumentieren die theoretische und experimentelle Untersuchung einer Methode zur aktiven Innenlärmminderung auf Basis von segmentierten Verkleidungselementen. Als vorteilhaft an der Segmentierung wird die gleichzeitige Möglichkeit zur Anwendung von Gegenschall (ANC) und aktiver Vibrations- bzw. Struktur-Akustik-Regelung angesehen. Untersuchungen zur Reduktion von stochastischem Breitbandlärm mit Hilfe einer aktiv gesteuerten Doppelschale sind in den Publikationen von Misol et al. [40, 41] dokumentiert.

In den vorangegangenen LuFo-Projekten SINTEG und DIANA wurden Vorarbeiten für das Projekt SYLVIA geleistet. In SINTEG wurde der Konzeptnachweis des aktiven Linings anhand eines sog. Spacer-Linings (einfache Geometrie ohne Fenster) erbracht [1]. Im Rahmen von DIANA wurde ein Vorserienbauteil eines Airbus-A350-Linings experimentell und numerisch untersucht [2]. Der Aufbau einer Rumpfschale und eines Labordemonstrators sowie die Untersuchung aktiver Maßnahmen war nicht Bestandteil von DIANA.

1.4.2 TP2 („Smart Ventilation“) und TP3 (Beheizbarer Kabinenluftauslass)

Konventionelle Ventilationskonzepte für Passagierflugzeugkabinen basieren heutzutage auf dem Prinzip der Mischlüftung (MV). Hierbei wird die frische Luft in Form von impulsreichen Strahlen in die Kabine eingeblasen [4]. In den Scherschichten dieser Strahlen entstehen Wirbel aufgrund der Kelvin-Helmholtz-Instabilität, die wiederum zu einer effizienten Durchmischung von frischer und verbrauchter Luft führen [4]. Die Zuluftstrahlen induzieren bei MV idealerweise zweidimensionale Luftwalzen, in denen die Luft in der Kabine zirkuliert, bevor sie unterhalb der Dado-Paneele in Bodennähe aus der Kabine heraus und zu den Drucksinken im unteren Rumpfbereich strömt [5][6].

Vor dem generellen Hintergrund steigender Wärmelasten in modernen Flugzeugkabinen [7] suchen die Hersteller von Luftfahrzeugen seit einigen Jahren nach Alternativen. Hauptgründe sind die Eigenschaften von MV, bei hohen Wärmelasten Zugscheinungen herbeizuführen sowie die geringe Wärmeausfuhr-effizienz aufgrund eines hohen Anteils an Strömungskurzschluss [8]. Weitere potenziell kritische Eigenschaften von MV Systemen sind die Erzeugung von Lärm, Verteilung von Verunreinigungen und Keimen, Austrocknung von Schleimhäuten sowie die limitierte Flexibilität bei Kabinenrekonfigurationen. Die trockene Luft wird insbesondere bei Langstreckenflügen als starke Beeinträchtigung des Komforts empfunden. Die für Mischlüftung charakteristischen Luftwalzen erlauben Zonierungen zudem nur in Längsrichtung der Kabine. Die vom Markt geforderte Flexibilisierung der Passagierkabine wird dadurch in vielerlei Hinsicht gebremst und eingeschränkt.

Entsprechend werden alternative Belüftungskonzepte zur MV für Flugzeugkabinen seit einigen Jahren intensiv erforscht. In der Literatur zu findenden Studien werden dabei im Wesentlichen durch die Themen thermischer Passagierkomfort und Luftqualität bzw. Verteilung und Abtransport von Verunreinigungen getrieben [7][8] [9][10][11][12][13][14][15][16][17][18][19]. Hauptsächlich werden dabei zwei Ansätze verfolgt, und zwar CDV sowie passagiernahe Ventilation. Verdrängungslüftung (CDV) wird als wesentlich weniger anfällig hinsichtlich der oben angesprochenen Nachteile von MV angesehen. CDV basiert auf der Zufuhr von Frischluft in die Kabine mit geringem Impuls, in der Regel in Bodennähe. Sie bildet dabei einen sog. „Frischlufsee“, aus dem sie bei Erwärmung an den Wärmelasten lokal aufsteigt. Die verbrauchte Luft tritt dagegen im Deckenbereich wieder aus der Kabine aus. Infolge dieses Luftführungsprinzips erzeugt jeder Passagier seine eigene „Frischluftecke“, wobei die erwarteten Strömungsgeschwindigkeiten wesentlich geringer als bei MV ausfallen. Darüber hinaus wird bei CDV eine deutlich höhere Wärmeaustragseffizienz beobachtet, da aufgrund des Luftführungsprinzips sichergestellt ist, dass die Frischluft vor dem Austreten aus der Kabine tatsächlich in die Nähe der Wärmequellen gelangt. Die Luftqualität in der Aufenthaltszone der Personen verbessert sich, da Schadstoffe nicht mehr im Raum verteilt werden. Die niedrigen Luftgeschwindigkeiten reduzieren die Austrocknung, sodass die trockene Raumluft in der Flugzeugkabine als weniger unangenehm empfunden wird. Die Nutzung des Quellluftprinzips im Flugzeug wurde seitens Airbus Deutschland im Herbst 2007 zur Patentierung eingereicht [21].

Auf dem Arbeitsgebiet alternativer Belüftungskonzepte wurde im Projekt DLR4SINTEG bereits gezeigt, dass durch Kombination von boden- und deckenseitiger Verdrängungslüftung gleichzeitig eine hohe Wärmeaustragseffizienz HRE bei niedrigen Temperaturschichtungen und Turbulenzniveaus, d.h. bei hohem thermischen Passagierkomfort erreichen lassen [1][18]. Die Untersuchungen wurden jedoch ausschließlich unter stationären Bedingungen durchgeführt, sodass die Frage, inwiefern die positiven Eigenschaften der deckenseitigen Verdrängungslüftung auch unter dynamischen Lastfällen zum Tragen kommen, zunächst offenbleiben musste.

Im Teilprojekt „Smart Ventilation“ des DIANA-Verbundprojektes wurde aus diesem Grund bereits begonnen das dynamische Verhalten der beiden Belüftungskonzepte Mischlüftung (MV) und deckenseitige Verdrängungslüftung (CCDV) experimentell zu untersuchen und zu charakterisieren. Hierbei wurde auf die Ausbreitung lokaler Wärmelasten sowie die Wirkung lokal veränderlicher Volumenströme fokussiert [1].

Bei der Belüftung von Flugzeugkabinen wird heutzutage eine möglichst gleichmäßige Volumenstromverteilung im Passagierbereich angestrebt, die auf den Fall der voll besetzten Kabine ausgelegt ist. Mit marktgemittelten, durchschnittlichen Belegungsgrade (PLF - passenger load factors)

zwischen 74-89 %, je nach Markt, stellen unvollständig besetzte Kabinen und Sitzreihen heutzutage eher die Regel als die Ausnahme dar [20]. Die Kabine unterteilt sich in zwei („single-aisle“) oder mehrere („long-range“) Temperaturzonen à 50-100 Sitzplätze mit einem gemeinsamen Temperatursensor und einer gemeinsamen Einblastemperatur für die Temperaturregelung [5]. Hieraus ergibt sich, dass inhomogene Wärmelastverteilungen innerhalb der Zonen im laufenden Betrieb nicht kompensiert werden können. Je nachdem, an welcher Stelle sich der Temperatursensor relativ zu den Wärmelasten befindet, resultiert dies in einer lokalen Verschwendung von Kühlleistung oder in einer lokal ungenügenden Kühlung. Der Einsatz zusätzlicher Sensoren und die Berücksichtigung ihrer Messwerte in der Kabinenregelung würde es erlauben die Verteilung der Wärmelasten abzuschätzen und somit den Komfort zu erhöhen. Mit einer Regelung der Volumenströme oder der Einströmtemperaturen in Abhängigkeit der lokalen Wärmelastdichte (Passagierzahlen, aktuelle Leistung von Verbrauchern, etc.) wäre es möglich, die Temperaturverteilung zu optimieren und die Energieeffizienz zu steigern, da die Menge der Außenluft bzw. die gesamte Heiz- oder Kühlleistung reduziert werden kann. Bei modernen Passagierflugzeugen erfolgt die Bedruckung beispielsweise teilweise nicht mehr mit Zapfluft sondern mit Frischluft aus der Grenzschicht. Diese muss vor der Zufuhr in die Kabine aufgeheizt werden. Einzeln oder segmentweise beheizbare Luftauslässe würden eine feine Dosierung der lokalen Heizleistung erlauben und damit die Ausnutzung ohnehin vorhandener Wärmelasten zur Temperierung der Kabinenluft. Ähnliche Konzepte verteilter, bedarfsorientierter Belüftungssysteme sind heutzutage aus dem Gebäudebereich bekannt. Hierbei wird die Zuluftmenge jedoch nicht in Abhängigkeit der lokalen Temperaturen sondern in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration geregelt, die hier in der Regel limitierend wirkt, mit dem Ziel, die Luftqualität im Aufenthaltsbereich und die Energieeffizienz des Systems zu erhöhen [22][23].

Während die Studien in der Literatur zur Belüftung von Flugzeugkabinen bei stationären sehr zahlreich sind (einen kleinen Ausschnitt stellen die Literaturstellen [4][9][10][11][12][13][14][15][18][19] dar), gibt es nur sehr wenige Studien, die sich mit dem dynamischen Verhalten und der Stabilität bei nicht-idealen Randbedingungen auseinandersetzen. Letztere sind jedoch höchst relevant für den operationellen Betrieb. Die Effekte, die die Leistung der Kabinenbelüftung beeinflussen können, sind mannigfaltig und umfassen zeitliche Variationen von Wärmelasten (etwa durch Unterhaltungselektronik, mitgebrachte elektrische Geräte, Küchenbetrieb, etc.), asymmetrisch verteilte Wärmelasten (etwa durch Sonneneinstrahlung, inkomplett besetzter Kabine, sich bewegende Passagiere), Wechselwirkungen zwischen den Zuluftstrahlen oder zwischen Zuluftstrahlen und sich bewegenden Passagieren.

Obwohl diese Fragestellungen von erheblicher Bedeutung für die Bewertung neuer Belüftungsvarianten hinsichtlich des operationellen Betriebes sind, existieren hierzu neben unseren eigenen Studien [8][1][16][17][18][24] nur wenige Studien in der Literatur. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick gegeben werden.

Bianco et al. befassten sich beispielsweise mit der transienten thermischen Kopplung von Strömungsfeld und Flugzeugrumpf bzw. -umgebung [25], die die oben formulierten Fragestellungen jedoch nur am Rande betrifft.

Ein weiteres wichtiges Thema, das bedingt mit unserer Studie verwandt ist, ist der transiente Transport von Verunreinigungen (Gasen, Tröpfchen) in Kabinenströmungen. Diese Fragestellung hat vor allem vor dem Hintergrund des Ausbruchs des „severe acute respiratory syndrome“ an Bord eines Fluges von Hong Kong nach Beijing in 2002 große Aufmerksamkeit erhalten [26]. Häufig wer-

den die Strömungen bzw. die dabei zugrunde liegenden Randbedingungen als stationär angenommen, siehe etwa [19][30][31]. Unsere Studie grenzt sich von diesen Untersuchungen jedoch dadurch ab, dass bei den von uns betrachteten lokalen Wärmelasten davon auszugehen ist, dass diese die Strömung selber aufgrund der induzierten Auftriebskräfte verändern („aktiver Skalar“). Daher ist die zugrunde liegende Strömungsform nicht mehr als stationär anzusehen.

Den Aspekt der Ausbreitung von Luftverunreinigungen durch im Gang stehende oder sich bewegende Personen untersuchten Mazdumar et al. [27][28]. Die Ausgangshypothese war, dass im Gang bewegte Personen Kielwassergebiete erzeugen können, in denen Verunreinigungen noch weiter transportiert werden können als bei ungestörter Mischlüftung. Die experimentellen Ergebnisse aus isothermen Messungen mit Wasser als Arbeitsfluid wurden hierbei auch dazu eingesetzt, um CFD-Simulationen zu validieren, die für die Vorhersagen verwendet wurden. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die sitzenden Passagiere eine Verteilung der Verunreinigungen in laterale Richtung tendenziell blockieren, während ein im Gang beweglicher Körper die Schadstoffe in seinem Kielwasser den kompletten Weg mit sich transportieren kann. Es zeigte sich auch, dass die Ergebnisse von der genauen Form des beweglichen Körpers abhängen, die daher möglichst menschenähnlich sein sollte, um genaue Vorhersagen zu erzielen.

Wu et al. analysierten den Einfluss einer instationären, periodisch variablen Luftzufuhr auf die transienten Strömungsfelder in einer Flugzeugkabine [29]. Die Autoren konnten mittels Strömungssimulationen zeigen, dass sich die mittleren Temperaturen und CO₂-Konzentrationen aufgrund der besseren Vermischung von frischer und rezirkulierter Luft im Vergleich zur konventionellen MV mit ihrem Verfahren reduzieren lassen. Dies wurde letztlich dadurch erzielt, dass die Pfade der Zuluftstrahlen durch die periodisch variierte Luftzufuhr dynamisch verändert wurden, wodurch die Bereiche mit hohem lokalen Luftaustausch vergrößert und die Totwassergebiete reduziert werden konnten. Im Unterschied zu den geplanten Untersuchungen in diesem Vorhaben wurde lediglich ein Kabinensegment, bestehend aus drei Sitzreihen, untersucht. Hierbei lag der Fokus auf der Veränderung der Mischung innerhalb dieses Segmentes.

Erste grundlegende Arbeiten zu der Thematik avancierter Temperaturregelungen in Flugzeugkabinen werden bereits in dem LuFo-Projekt STELLA durchgeführt [32]. Allerdings werden hier bislang nur einfache Reglerstrukturen sowie Sensorkonzepte bearbeitet, die eine Umsetzung einer verteilten Kabinen-Klimatisierung, wie in „Smart Ventilation“ geplant, nicht umfassen.

1.5 Zusammenarbeit

Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung und regelmäßigem Austausch mit dem Verbundpartner DAC durchgeführt. Es erfolgte ein regelmäßiger Austausch über den Projektfortschritt und eine gemeinsame Bewertung der Projektergebnisse.

Für das Teilprojekt 1 wurde in Absprache mit DAC ein Doppelschalendemonstrator definiert. Die Verwendung eines Airbus-A350-Seitenwandpaneels als Basis-Struktur für das Smart Lining geschah auf Vorschlag von DAC. Es wurde eine generische aber realitätsnahe CFK-Rumpfstruktur definiert und dessen Eignung mit DAC und Airbus abgestimmt. Zu Projektbeginn hat DAC dem DLR ein entsprechendes Seitenwandpaneel aus seiner Serienproduktion zur Verfügung gestellt. Ferner wurden zusätzliche Dämm Pakete für die Realisierung der Primärisolierung beigestellt. Der Projektfortschritt wurde neben den regulären Projekttreffen und Telefonaten auch zweimal in Braunschweig vorge-

stellt. Dabei konnte die akustische Wirksamkeit beider Smart-Lining-Konfigurationen (Laborsystem und Low-Cost-System) im Transmissionsprüfstand demonstriert werden.

Für Teilprojekt 2 und 3 stellte DAc zwei Funktionsmuster von leichten, beheizbaren Luftauslässen zur strömungstechnischen Qualifizierung durch das DLR bereit. Zusätzlich wurden Funktionsmuster von gemeinsam entwickelten, schnell heizbaren Zuluftstutzen durch DAc bereitgestellt. Nach erfolgreichem Funktionsnachweis durch das DLR stellte DAc Zuluftstutzen für die gesamte Do 728 Kabine bereit. Basierend auf einem Architekturentwurf durch das DLR entwickelte DAc eine Regелеlektronik und –hardware für die Zuluftstutzen zunächst eines einzelnen Segmentes. Nach erfolgreichem Test im Prüfstand durch das DLR stellte DAc schließlich die Regelhardware für die gesamte Kabine bereit. Die Einrüstung und Inbetriebnahme erfolgte durch das DLR. Im Rahmen der Aufstockung wurde die Hardware noch einmal durch das DLR und die Software entsprechen durch DAc erweitert, um mehr Regelsensoren berücksichtigen zu können. Für die heizbaren Zuluftstutzen wurde ein gemeinsames Patent angemeldet (siehe [10] in Abschnitt 2.4).

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 TP1 – „Smart active Lining Module“

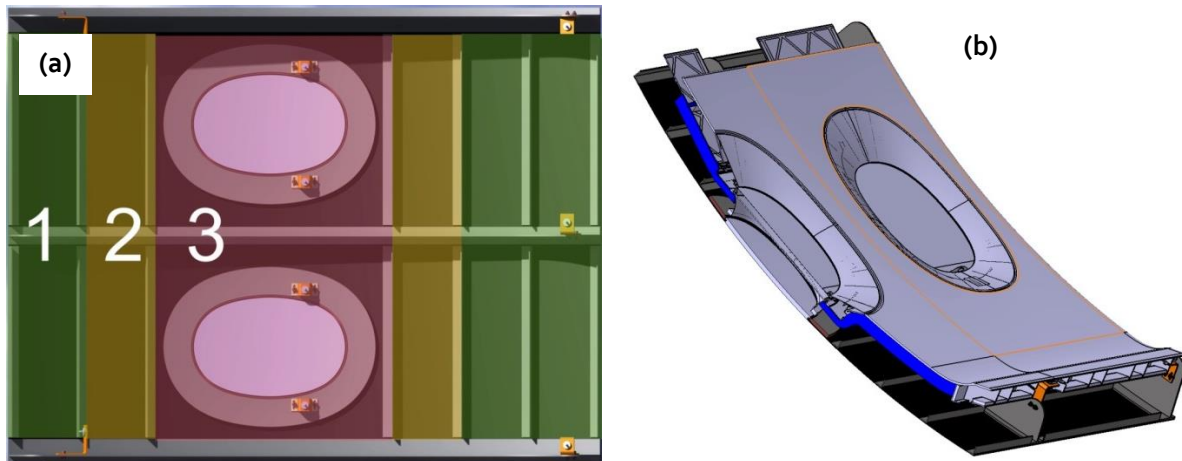


Abbildung 4: (a) Airbus-A350-ähnliche CFK-Rumpfstruktur und (b) Airbus-A350-Seitenwand montiert auf der CFK-Rumpfstruktur.

Das Teilprojekt 1 gliedert sich in sechs Arbeitspakete. Auf die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete wird im Folgenden genauer eingegangen. Ein wichtiges Ergebnis der Arbeitspakete 1.1 und 1.2 war die Realisierung eines Airbus-A350-ähnlichen Rumpfpaneels, an welchem das Seitenwandpaneel (Lining) mit serienmäßigen Halterungen montiert und getestet werden konnte. Durch die akustische Anregung des Rumpfpaneels wird das Lining ähnlich wie im Flugzeug zu Schwingungen angeregt und strahlt Schall in die Kabine bzw. den angekoppelten Raum ab. Dadurch wird eine belastbare Bewertung der Lärmreduktionsmaßnahmen möglich. Eine originale Rumpfstruktur stand nicht zu Verfügung und ein identischer Nachbau war aufgrund des limitierten Projektbudgets nicht möglich. Aus diesem Grund wurde eine vereinfachte Rumpfstruktur entworfen und gefertigt. Die Definition der vereinfachten Rumpfstruktur erfolgte in Abstimmung mit DAC und Airbus. Ziel war es, eine Rumpfstruktur abzuleiten, welche die vibroakustischen Eigenschaften und Transmissionspfade eines Airbus-A350-Rumpfsegments approximiert. Die CFK-Rumpfschale hat die Dimension: $1690 \times 1300 \text{ mm}^2$ (Spant- x Stringerrichtung) und einen Radius von 2980 mm. Die Haut ist aus CFK UD (Unidirektional) Tapes als Gelege aufgebaut mit unterschiedlichen Dicken in den Bereichen 1, 2 und 3 (siehe Abbildung 4). Die Haut ist in den Bereichen 1 am dünnsten und im Bereich 3 am dicksten. Die Rumpfschale besitzt zwei Fenster mit Scheiben aus 15 mm dickem Acrylglas und zwei Fensterrahmen aus 12 mm dickem Aluminium. Die Fensterrahmen sind mit der CFK-Haut verklebt. Die Stringer und Spanten werden vereinfacht in L- bzw. T-Geometrie aus Aluminium ausgeführt. Der Stringerabstand beträgt 200 mm und der Spantabstand beträgt 635 mm. Die Montage des Linings an die Rumpfstruktur erfolgt an 9 Positionen im Spant- und Fensterbereich (siehe Abbildung 4).

Die Sekundärstruktur ist ein Airbus-A350-Lining aus der Serienfertigung von DAC. Es ist ausgestattet mit 9 strukturellen Halterungen für die Montage (an den primärseitigen Lagerungspunkten, siehe Abbildung 4 und mit einer sekundärseitigen thermo-akustischen Isolierung. Vor der Montage des Linings an die Rumpfstruktur wurde eine primärseitige thermo-akustische Isolierung an der

Rumpfstruktur befestigt. Abbildung 4 (b) zeigt eine Schnittdarstellung des gekoppelten Systems ohne Primärisolierung. Mit der vollständigen Definition des Lining-Systems wurde Meilenstein 1.1 erreicht. Meilenstein 1.2 war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht, weil die aktiven Komponenten des Linings noch fehlten.

Nach Fertigstellung der CFK-Rumpfstruktur wurde in Arbeitspaket 1.4 ein dynamisches FE-Modell erstellt. Das FE-Modell der CFK-Rumpfschale ist in Abbildung 5 (a) dargestellt. Farblich kodiert sind dabei die Sektionen der unterschiedlichen Hautfelder, Spant- und Stringerbasen sowie Fenster und Fensterrahmen erkennbar. Das Modell der Rumpfschale wurde mit dem validierten Lining-Modell gekoppelt und in der Kavität wurde das Fluid sowie die Fluid-Struktur-Interaktion mit Hilfe von Fluid30-Elementen in der FE-Software Ansys nachgebildet.

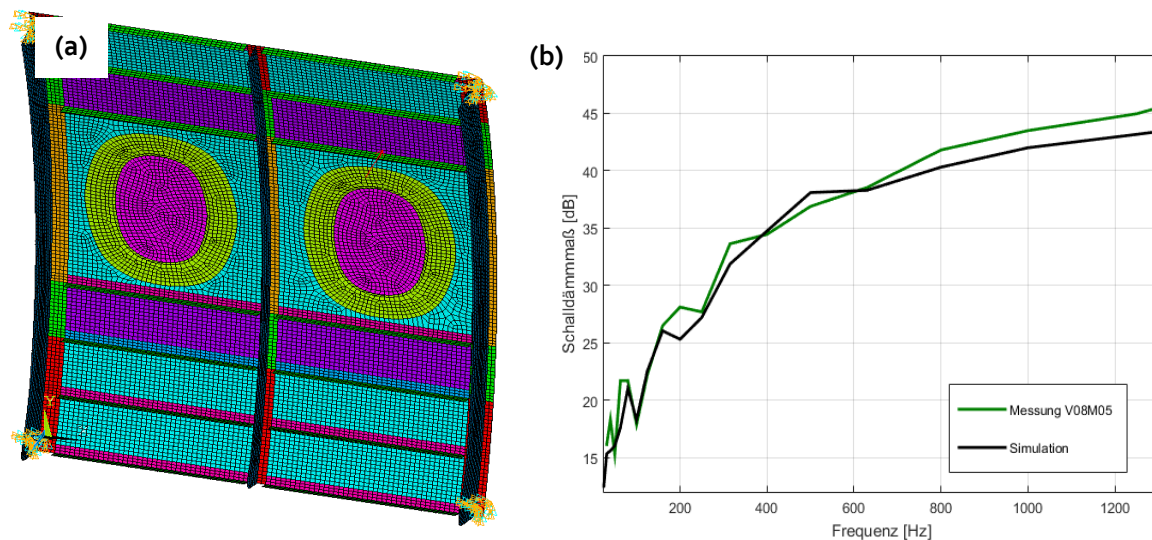


Abbildung 5: (a) FE-Modell der CFK-Rumpfschale und (b) Vergleich des berechneten und gemessenen Schalldämmmaßes der Doppelschale aufgetragen in Terzbändern.

Die Validierung des dynamischen Doppelschalenmodells erfolgte durch einen Abgleich von simuliertem und gemessenem Schalldämmmaß. Zur Durchführung von Messungen wurde ein Laborversuch im Transmissionsprüfstand aufgebaut. Der Aufbau des Laborversuchs war Bestandteil von Arbeitspaket 1.3 und stellte den Meilenstein 1.3 dar. Für die Berechnung des Schalldämmmaßes des FE-Modells wurde eine Diffusfeldanregung gemäß [42] auf der äußeren Haut der Rumpfschale realisiert. Dafür wurden gleichmäßig verteilte Punktschallquellen auf einer Halbkugel in großer Entfernung zur Struktur positioniert und mit stochastischer Phase überlagert. Im Anschluss an die Berechnung der Strukturantwort erfolgte die Quantifizierung der abgestrahlten Schallleistung auf Basis der Schallstrahlungsresistanzmatrix [43] unter Verwendung der normalen Strukturschnellekomponente des Linings. Der Vergleich von berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß ist in Abbildung 5 (b) in Terzbändern aufgetragen. In den betrachteten Frequenzbändern 31,5 Hz und 1250 Hz ist dabei eine gute Übereinstimmung erkennbar, wobei die Abweichungen einen Pegel von 3 dB nicht überschreiten. Damit galt das FE-Modell des Doppelschalensystems als validiert und Meilenstein 1.4 erreicht.

Aus dem herkömmlichen, passiven Seitenwandpaneel entsteht ein aktives Bauteil das sog. Smart Lining durch das Hinzufügen von Aktuatoren, Sensoren und einer digitalen Steuereinheit. Über die Aktuatoren können Kräfte kontrolliert in das Bauteil eingeleitet werden, um das Schwin-

ungsverhalten und die Schallabstrahlung gezielt zu beeinflussen. Mit Hilfe der Sensoren kann die Steuereinheit überwachen, ob die Aktuatoren zielgerichtet wirken und die Steuerung ggf. adaptieren. Um ein möglichst effizientes System zu definieren, sollte die Anzahl und die Position der Aktuatorik und der Sensorik sinnvoll gewählt werden. Dazu kann eine Optimierung durchgeführt werden. Mit Hilfe des validierten Doppelschalenmodells lässt sich die Schalldämmung in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter und Randbedingungen zuverlässig berechnen und so ein Verständnis über die wesentlichen Vorgänge der Schalltransmission gewinnen (z.B. relativer Beitrag der Fenster zur Schalltransmission in Abhängigkeit der Frequenz). Eine hinreichende Genauigkeit ist jedoch nur in Terzbändern und nicht schmalbandig d.h. bei einzelnen Frequenzen gegeben. Aus diesem Grund erfolgte die optimierte Definition der Aktuator- und Sensorpositionen auf Basis von Messdaten. Durch die Verwendung von Messdaten-Modellen kann eine deutlich höhere Genauigkeit erzielt werden, was zu einer höheren Prognosegüte und einer potenziell besseren Aktuator- und Sensordefinition führt.

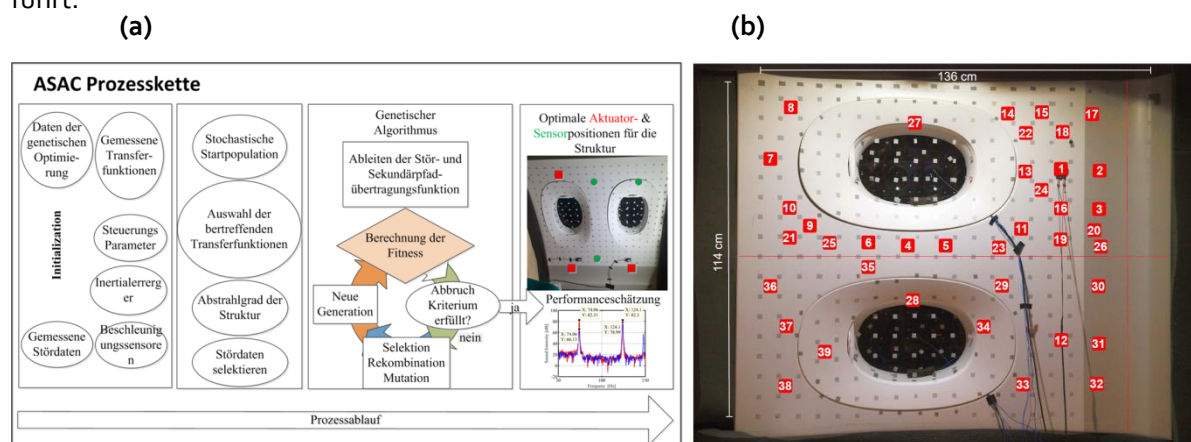


Abbildung 6: (a) Ablauf der ASAC-Prozesskette zur Optimierung der Aktuator- und Sensorpositionen und (b) mögliche Aktuatorpositionen (1 bis 39) und Sensorpositionen (graue Punkte) auf dem Lining.

Wie in Abbildung 6 (a) dargestellt, werden die gemessenen Frequenzgangs- (Transferfunktionen) und Stördaten im ersten Schritt der ASAC-Prozesskette eingelesen. Endergebnis der Optimierung ist eine hinsichtlich der abgestrahlten Schallleistung optimierte Aktuator- und Sensorkonfiguration, sowie eine Abschätzung der akustischen Wirksamkeit des Smart Linings. Die Anzahl von Aktuatoren und Sensoren wird vorab festgelegt. In Abbildung 6 (b) sind die vermessenen Aktuator- und Sensorpositionen dargestellt. Das Sensornetz entspricht den grauen Laserreflektorpunkten, welche regelmäßig auf der Lining-Oberfläche verteilt sind. Die vermessenen Aktuatorpositionen sind numeriert. Der Frequenzgang jedes Aktuators auf die Sensorpunkte wurde in einem separaten Laserscan ermittelt. Dazu wurde immer derselbe Aktuator entsprechend neupositioniert. Verglichen mit einer Simulation ist dieses Vorgehen zwar weniger flexibel aufgrund der Verwendung von Messdaten jedoch deutlich genauer.

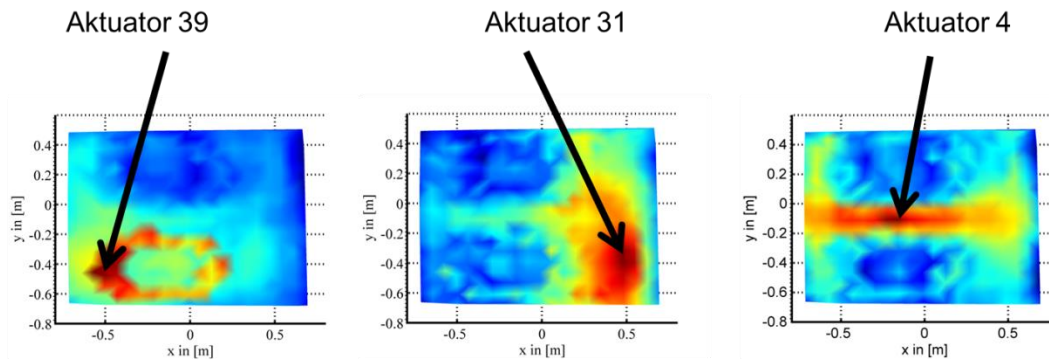


Abbildung 7: Einkoppelverhalten eines Aktuators in Abhängigkeit von der Position auf dem Lining. Die Einkopplung erfolgt lokal. In den roten (blauen) Bereichen erfolgt eine starke (schwache) Einkopplung des Aktuators in die Strukturndynamik.

In Abbildung 7 sind exemplarisch drei Schwingungsbilder des Linings bei Anregung an drei verschiedenen Positionen dargestellt. Rote Bereiche weisen auf eine Amplitudenüberhöhung hin. Deutlich sichtbar ist das lokale Einkoppelverhalten der Aktuatoren. Abhängig von der Aktuatorposition lassen sich daher bestimmte Bereiche des Linings schwingungstechnisch besser oder schlechter beeinflussen. Durch Auswertung der Betriebsschwingformen und unter der Annahme, dass große Hautfelder in der Regel auch mehr Schall abstrahlen, erscheint eine Positionierung relativ mittig unterhalb der beiden Fensterbereiche (entsprechend Aktuator 31) plausibel. Eine solche Platzierung zweier Aktuatoren wurde für die Implementierung der adaptiven Steuerung herangezogen. Wie Abbildung 6 a) zeigt, korreliert dies auch mit dem Ergebnis der ASAC-Prozesskette (wenn der dritte Aktuator oberhalb des linken Fensters entfällt). Durch die Ableitung einer finalen Aktuator- und Sensorkonfiguration für das Smart Lining wurde Meilenstein 1.2 erreicht.

Die in Arbeitspaket 1.5 geplanten Experimente wurden in einem akustischen Transmissionsprüfstand durchgeführt. Dieser besteht, wie in Abbildung 8 gezeigt, aus einem Hallraum und einem reflexionsarmen Raum. Die Räume sind ausschließlich über die Prüföffnung und den darin montierten Prüfkörper miteinander verbunden. Die Störanregung des Prüfkörpers erfolgte mittels eines Lautsprecherfeldes, welches vor der Rumpfschale positioniert wird. Um die Einflüsse des Nachhalls zu reduzieren, wurden die Öffnungen zwischen Rumpfschale und Lautsprecherfeld mit Akustikschaum abgedichtet (blaue Rechtecke in Abbildung 8, nicht zu sehen in Abbildung 9). Das Lautsprecherfeld hat 112 unabhängig ansteuerbare Lautsprecher, welche in 14 Zeilen zu je acht Lautsprechern angeordnet sind. Über das Lautsprecherfeld wurde Störschall abgespielt, welcher relevant für Triebwerke mit gegenläufigen Rotoren (CROR) oder konventionellen Rotoren ist. Rotortriebwerke sind besonders energieeffizient und werden deshalb zukünftig an Bedeutung gewinnen. Ein Nachteil solcher Triebwerke ist die extrem hohe Schallabstrahlung der Rotorblätter, welche zu hohen Schallpegeln in der Kabine führt. Der Störschall von Rotortriebwerken ist multi-tonal, d. h. er enthält die Grundfrequenz der Rotordrehzahl multipliziert mit der Anzahl an Rotorblättern (Blattfolgefrequenz) und Höherharmonische. Aufgrund von Simulationsergebnissen für ein generisches CROR-Triebwerk ist bekannt, dass die höchsten Störpegel im Frequenzbereich von 100 Hz bis 500 Hz zu erwarten sind [44]. Aus diesem Grund wurde das aktive System für diesen Frequenzbereich ausgelegt, welcher die ersten fünf CROR-Frequenzen: 119.4 Hz, 149.2 Hz, 268.6 Hz, 388 Hz und 417.9 Hz beinhaltet. Die Synthese erfolgt mit dem Lautsprecherfeld und einer Schallfeld-Rekonstruktionsmethode. Weitere Informationen zu der gewählten CROR-Störanregung und der

Synthese im Labor können Algermissen et al. [44] entnommen werden. Das Lining ist an der Rumpfschale montiert und die Öffnungen werden mit Akustikschaum abgedichtet. Die reale Einbausituation im Flugzeug verhindert eine Leckage des Schalls nach unten und oben (hier im Experiment rechts und links) durch die Anbindung an den Fußboden bzw. die Hat Racks und seitlich durch die Verbindung der Linings untereinander. Die Schallabstrahlung des Linings erfolgt in einen reflexionsarmen Raum, welcher hier vereinfachend die Flugzeugkabine repräsentiert.

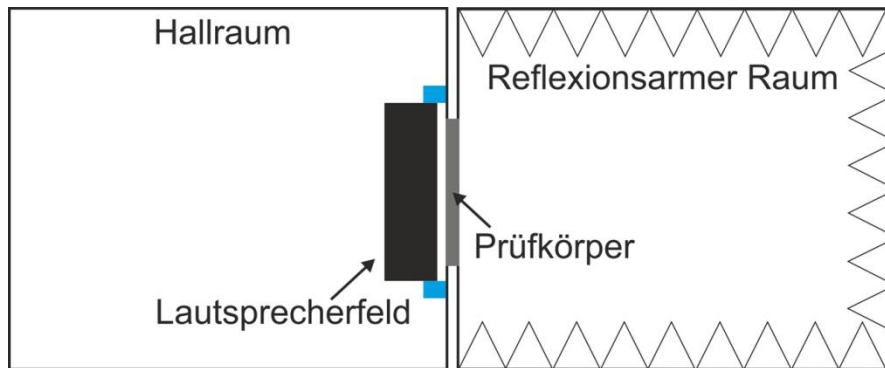


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im akustischen Transmissionsprüfstand (Draufsicht).

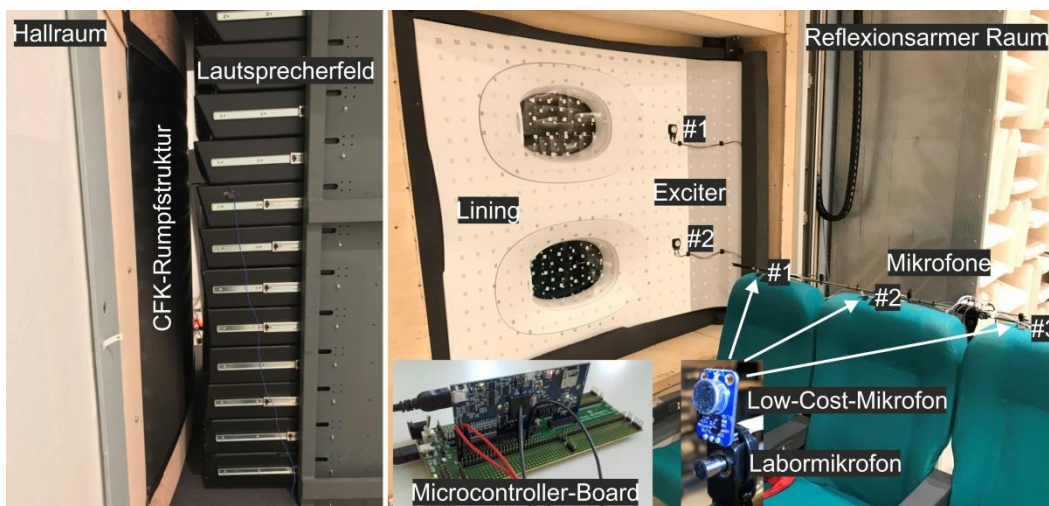


Abbildung 9: Versuchsaufbau im akustischen Transmissionsprüfstand aus Sicht des Hallraums (li.) und aus Sicht des reflexionsarmen Raums (re.).

Der reale Versuchsaufbau im akustischen Transmissionsprüfstand ist in Abbildung 9 zu sehen. Im Hallraum ist das Lautsprecherfeld direkt vor der CFK-Rumpfstruktur positioniert. Die Rumpfstruktur ist in einem hochschalldämmenden Holzrahmen gelagert, welcher als Adapter zwischen dem Prüfenster und der Rumpfstruktur dient. Um einen vorhandenen Holzrahmen mit möglichst geringen Modifikationen wiederverwenden zu können, wurde der Prüfkörper um 90° rotiert eingebaut. Dies beeinträchtigt jedoch nicht die Aussagekraft der Experimente. Aus Sicht des reflexionsarmen Raums, welcher die Flugzeugkabine repräsentiert, ist in Abbildung 9 (re.) das aktive Lining mit zwei Aktuatoren (Exciter) zusehen. Vor dem Lining steht eine Flugzeugsitzreihe mit drei Sitzen auf der im Kopfbereich je ein Fehlermikrofon befestigt ist. Je nach Konfiguration werden entweder die Labormikrofone oder die Low-Cost-Mikrofone als Fehlersensoren verwendet.

Jedes Smart Lining ist mit zwei Inertialaktuatoren des Typs Visaton EX 45 S ausgestattet. Dieser Aktuatortyp hat eine maximale RMS-Leistung von 10 Watt und eine Masse von ca. 60 Gramm. Es wurden zwei unterschiedliche Smart-Lining-Konfigurationen untersucht. Die erste Konfiguration ist ein Smart Lining mit Laborhardware. Die Untersuchung eines solchen Systems entsprach der ursprünglichen Planung im Rahmen von Arbeitspakt 1.5 (ohne Projektaufstockung). Das Laborhardware-System verwendet kalibrierte Labormikrofone des Typs PCB T130D21 als Fehlersensoren und ein dSPACE Rapid-Control-Prototyping-System. Die zweite Konfiguration ist ein Smart Lining mit kommerziell verfügbarer Low-Cost-Hardware. Die Untersuchung eines solchen Systems erfolgte im Rahmen von Arbeitspakt 1.6 (Projektaufstockung). In dieser Konfiguration werden Elektret-Mikrofone mit Vorverstärker vom Typ MAX 4466 als Fehlersensoren und eine TI Delfino Mikrocontroller Einheit (MCU) des Typs TMS320F2837xD verwendet (siehe Abbildung 12). In beiden Konfigurationen werden dieselben Verstärker und Aktuatoren verwendet. Bei diesen handelt es sich nicht um Laborhardware. In Abbildung 10 ist ein Schema des Versuchsaufbaus mit einem Smart Lining und den wesentlichen Systemen und Signalen dargestellt.

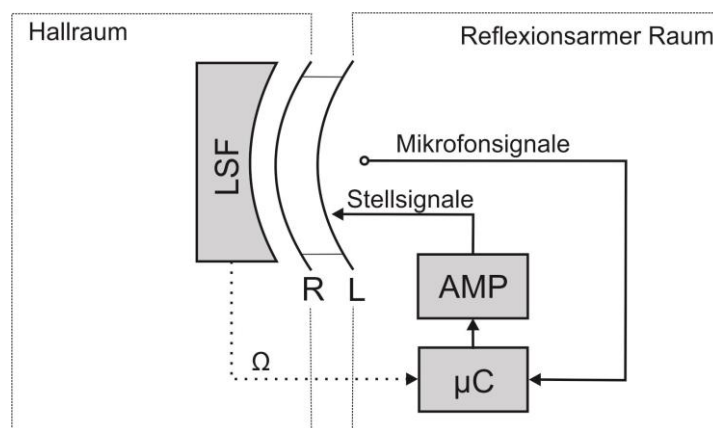


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des aktiven Linings mit den wesentlichen Systemen und Signalen.

Der Algorithmus der adaptiven Steuerung wurde im Wesentlichen aus Johansson et al. [45] übernommen und auf die Problemstellung angepasst. Er basiert auf dem komplexen filtered-x LMS (cLMS) Algorithmus, welcher sich besonders für eine effiziente Implementierung multitonaler Störgrößenaufschaltungen eignet. Abbildung 11 zeigt ein Blockschaltbild des aktiven Linings mit dem auf dem Mikrocontroller implementierten Algorithmus. Der Block **P** beschreibt das Übertragungsverhalten des Lautsprecherfelds auf die Mikrofone (Primärstrecke) und Block **G** beschreibt das Übertragungsverhalten des Smart Lining auf die Mikrofone. Das Fehlersignal **e** entsteht aus der Differenz der beiden Systemausgänge. Es soll minimiert werden, um den Schalldruck in der Kabine zu reduzieren.

Es wurde vereinfachend angenommen, dass die Frequenzen der CROR-Störanregung über das LSF konstant und dem Mikrocontroller bekannt sind. Im realen Flugbetrieb muss eine Drehzahlinformation der Rotorwelle bzw. der Rotorwellen (eine im Flugzeug verfügbare Information) fortlaufend vom Mikrocontroller eingelesen werden, damit dieser auf Veränderungen der Frequenz reagieren (d.h. die Steuerungsfiler adaptieren) kann. Die Referenzsignale **X** werden durch das adaptive Filter **W** gefiltert, um die Stellsignale **U** zu erzeugen. Jeder Aktuator wird über ein adaptives komplexes Filtergewicht pro Frequenz angesteuert. Daraus resultiert die hohe numerische Effizienz des Al-

gorithmus - insbesondere auch für den Fall benachbarter Frequenzen (Beating-Effekt) wenn Steuer- und Backbordrotoren nicht perfekt synchronisiert sind. Da die Störanregung fünf Frequenzen beinhaltet, werden für das Smart Lining mit zwei Aktuatoren insgesamt zehn adaptive komplexe Filtergewichte benötigt. Die Adaption der komplexen Filtergewichte erfolgt in Echtzeit durch die Berechnung von Gleichung (1) im cLMS-Block in Abbildung 11. Der aktuelle Abtastschritt zum Zeitpunkt t wird mit n bezeichnet und der nachfolgenden Abtastschritt zum Zeitpunkt $t+T$ (mit der Abtastschrittweite T) wird mit $n+1$ bezeichnet.

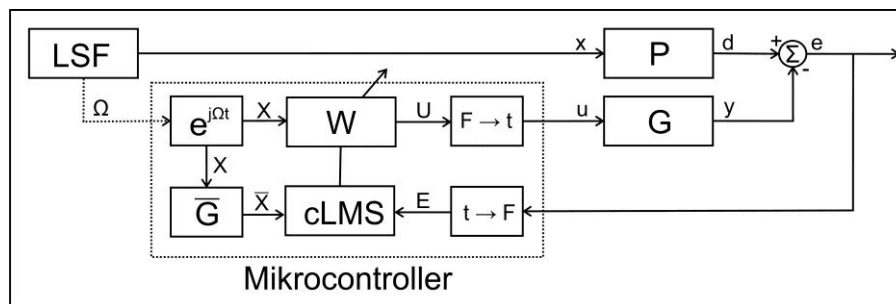


Abbildung 11: Blockschaltbild des auf dem Mikrocontroller implementierten adaptiven Steuerungssystems.

$$W_{rhl}(n+1) = W_{rhl}(n) - 2\mu_{rhl}X_{rh}^*(n)\bar{\mathbf{G}}_{rhl}^H\mathbf{E}(n) \quad (1)$$

In dieser Gleichung ist \mathbf{W}_{rhl} das komplexe Filtergewicht welches zu Aktuator \mathbf{l} und Frequenz \mathbf{h} des Referenzsignals \mathbf{r} gehört. Die komplexen Zahlen, welche den Frequenzgang der Sekundärstrecke bei den fünf Frequenzen beschreiben, werden in der Matrix \mathbf{G}_{rhl} gespeichert. Auch diese Methode ist – verglichen mit einer Zustandsraumbeschreibung – speichertechnisch und numerisch sehr effizient. Außerdem können akausale Systemkonfigurationen sehr leicht beschrieben und Modellierungsfehler vermieden werden. Der Vektor \mathbf{E} enthält die komplexen Fehlersignale (Phasen- und Amplitudeninformation). Dabei wird angenommen, dass die Referenzsignale \mathbf{X}_{rh} unkorreliert sind. Die Adaptionsschrittweite wird über den Skalar μ_{rhl} gesteuert. Dieser resultiert aus einer Approximation des Newton Algorithmus. Die Adaptionsschrittweite berechnet sich gemäß Gleichung (2).

$$\mu_{rhl} = \frac{\mu_0}{\rho_{rh} \sum_{m=1}^M |\bar{G}_{rhml}|^2} \quad (2)$$

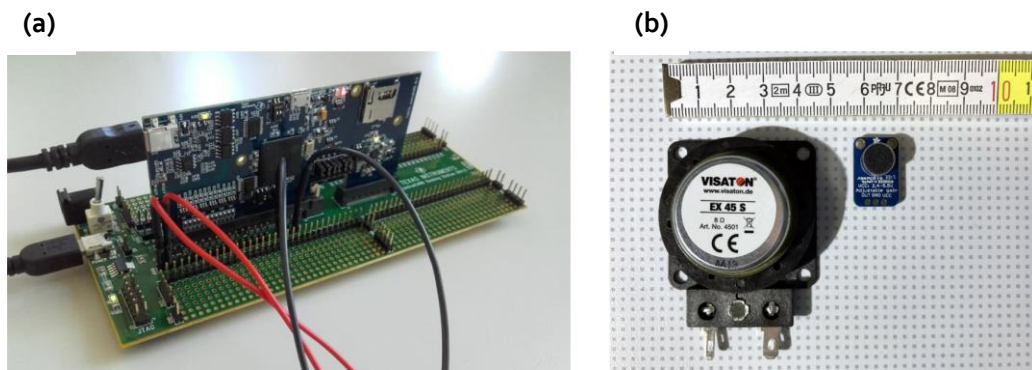


Abbildung 12: Evaluation Board mit Low-Cost-Microcontroller TI Delfino TMS320F2837xD (a) und Visaton EX45 S Exciter und Elektret Mikrofonkapsel mit Vorverstärkereinheit MAX 4466 (b)

Diese Wahl der Adaptionsschrittweite ist als Kompromiss zwischen der Robustheit des LMS-Algorithmus und der Adaptionsgeschwindigkeit des Newton-Algorithmus anzusehen. Der Zähler μ_0 muss dabei sorgfältig gewählt werden. Das theoretische Maximum von $\mu_0=1$ konnte im Experiment nicht stabil erreicht werden. Stattdessen mussten deutlich kleinere Werte in der Größenordnung $1e-4$ bis $1e-3$ gewählt werden. Dies liegt vermutlich an der vereinfachten Berechnung der Adaptionsschrittweite und der starken Querkopplung der Aktuatoren. Trotz der deutlich kleineren Adaptionsschrittweite konvergierte der Algorithmus innerhalb von ca. 1s. Der Skalar ρ_{rh} entspricht der Signalleistung von Referenzsignal rh . Der Nenner in Gleichung (2) enthält somit die Gesamtleistung der durch die Sekundärstrecke gefilterten Referenzsignale.

In Abbildung 13 ist ein Vergleich der Schallpegelreduktion der beiden untersuchten Smart-Lining-Konfigurationen relativ zum passiven Smart Lining (mit inaktiven Aktuatoren) dargestellt. Durch den Nachweis der akustischen Wirksamkeit der beiden untersuchten Smart Lining Konfigurationen wurden die Meilensteine 1.5 und 1.7 erreicht. Meilenstein 1.6 ist als Zwischenschritt zu Meilenstein 1.7 anzusehen. Er wurde ebenfalls erreicht, allerdings wird auf eine eingehende Darstellung an dieser Stelle verzichtet. Die Berechnung der dargestellten Terzbandpegel erfolgte durch energetische Summation der drei Mikrofonsignalspektren in Terzbändern. Zwei wesentliche Schlussfolgerungen können aus Abbildung 13 gezogen werden. Erstens wird deutlich, dass beide Smart-Lining-Konfigurationen eine erhebliche Schallpegelreduktion von bis zu 20 dB erreichen können. Bezogen auf eine anzunehmende Zusatzmasse von ca. 200 Gramm, ergibt sich eine Terzpegelreduktion von bis zu 100 dB pro Kilogramm Zusatzmasse. Verglichen mit einer rein passiven Massenbelegung, welche eine Schallpegelreduktion von etwa 12 dB pro Verdopplung der Masse (also ca. 1,33 dB/kg für das betrachtete Bauteil) erreicht (dies allerdings breitbandig für alle Frequenzen), ist das Smart Lining wesentlich effektiver. Zweitens wird in Abbildung 13 der Nachweis erbracht, dass die Verwendung von Low-Cost-Hardware nicht zu einer Verschlechterung der akustischen Wirksamkeit des Smart Lining führen muss. Die Terzbandpegel der beiden Konfigurationen sind auf einem vergleichbaren Niveau.

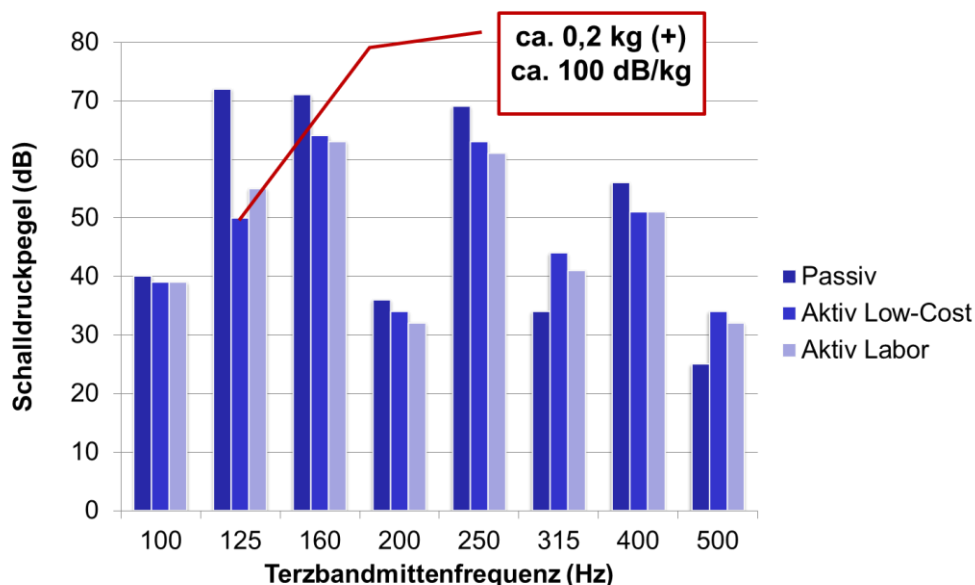


Abbildung 13: Vergleich der Schallpegelreduktion des Smart Linings mit Laborhardware (Aktiv Labor) und mit Low-Cost-Hardware (Aktiv Low-Cost) relativ zum deaktivierten Smart Lining (Passiv).

Zusammenfassend wird festgestellt, dass alle in Teilprojekt 1 projektierten Ziele zu Projektende erreicht wurden. Der Konzeptnachweis des Smart Linings unter realitätsnahen Laborbedingungen, welcher das primäre technische Arbeitsziel war, wurde erbracht. Ferner konnte der technologische Reifegrad durch die Verwendung von kommerziell verfügbarer Low-Cost-Hardware anstelle von Laborhardware erhöht werden. Auch die wissenschaftliche Zielsetzung der Stärkung der Kompetenzen des Antragsstellers im Bereich der numerischen Auslegung von aktiven Strukturen und deren experimentelle Vermessung und Bewertung unter realitätsnahen Laborbedingungen wurde erreicht. Durch die Präsentation der Projektergebnisse auf nationalen [5] und internationalen Konferenzen [7],[8],[9] konnten neue Impulse im Bereich der aktiven Struktur-Akustik-Regelung (ASAC) gesetzt und das wissenschaftliche Renommee des Antragsstellers befördert werden. Ferner konnte sich der Antragssteller die Rechte an der Smart Lining Technologie durch die Anmeldung eines Patents [11] und eines Gebrauchsmusters [12] sichern.

2.1.2 TP2 – „Smart Ventilation“

2.1.2.1 AP2.1 Reaktion auf nichtideale thermische Randbedingungen

Die in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse wurden auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2015 in Rostock vorgetragen und in dem entsprechenden Konferenzband publiziert, siehe [1] in Abschnitt 2.4. Im Folgenden geben wir einen kurzen, exemplarischen Einblick in die erzielten Ergebnisse.

Ziel dieses Arbeitspakets war die Quantifizierung des Einflusses ungleichmäßig verteilter Wärmelasten auf das Verhalten verschiedener etablierter und neuer Lüftungsvarianten (MV, CDV, CCDV). Hintergrund sind die bereits in Abschnitt 1.4 erwähnten PLF im operationellen Betrieb, denen zufolge eine unvollständig besetzte Kabine eher die Regel als die Ausnahme darstellt. Inwiefern dies die Temperaturhomogenität in der Kabine beeinflusst, war bislang unerforscht bzw. in der öffentlich zugänglichen Literatur nicht dokumentiert. Daher wurden diesem Arbeitspaket vier verschiedene, dedizierte Lastfälle einer teilweise besetzten Kabine hinsichtlich der resultierenden Temperaturhomogenität bei fünf verschiedenen Belüftungsvarianten untersucht, siehe Abbildung 14.

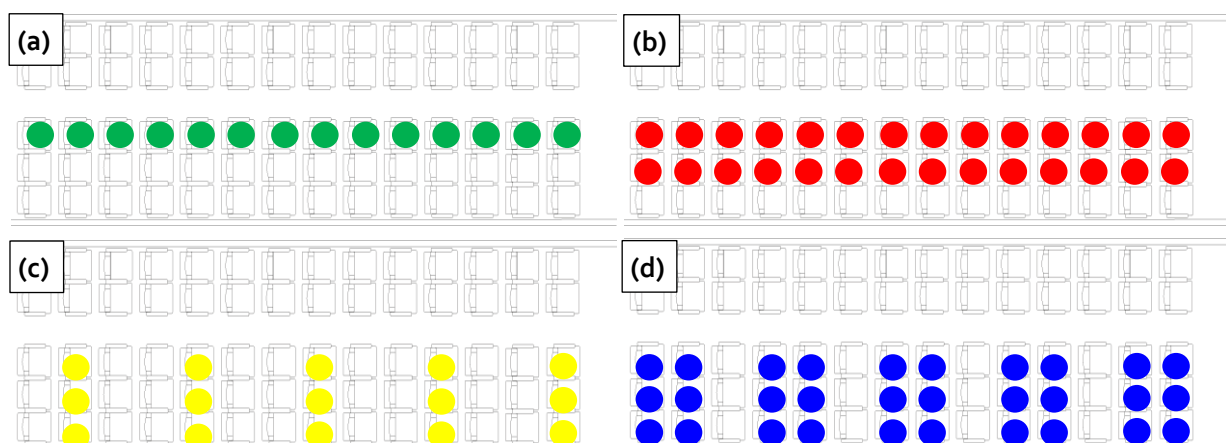


Abbildung 14: Lastfälle 1 (a), 2 (b), 3 (c) und 4 (d). An den gekennzeichneten Positionen wurden die Passagiermodelle ausgeschaltet.

Hierbei wurden die Lufttemperaturen auf Brusthöhe der Passagiermodellen analysiert. Je nach Lastfall ergaben sich Unterschiede in der gesamten Wärmelast zwischen 1050 W (1) und 2250 W (4) relativ zur voll besetzten Kabine. Vor Beginn jeder Messung wurde das Kabinenmodell mit komplett eingeschalteten TPDs und Belüftung für mehrere Stunden betrieben, um ausreichend stationäre Bedingungen zu gewährleisten. Nach dem Ausschalten der betreffenden Passagiermodelle wurde wiederum für mehrere Stunden gewartet. Die jeweils zuletzt erreichten Temperaturverteilungen wurden über 30 Minuten gemittelt. Zur Darstellung der Veränderungen ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 jeweils die Differenz zwischen End- und Anfangstemperaturen dargestellt.

Tabelle 2: Definition der untersuchten Belüftungsvarianten mit zugehörigem Volumenstrom an den jeweiligen Luftern- und Luftauslässen in [l/s].

	CCDV	CDV	Seitliche KLA	Decken KLA	Dado
MV	-	-	300	300	-600
CCDV	600	-	-600	-	-
CCDV-67-33	400	200	-600	-	-
CCDV-50-50	300	300	-600	-	-
CDV	-600	600	-	-	-

Als Beispiel sind in Abbildung 15 die Änderungen der Fluidtemperaturen auf Brusthöhe vor den TPDs für den Belüftungsfall CCDV-50-50 bei den vier verschiedenen Lastfällen dargestellt. Komplementär dazu sind in Abbildung 16 die entsprechenden Daten bei Lastfall 1 für fünf verschiedene Belüftungssysteme abgebildet.

Deutlich ist in den Temperaturverteilungen zu erkennen, an welchen Sitzpositionen die Passagiermodelle ausgeschaltet wurden. Ferner zeigt sich eine Beeinflussung der Temperaturen an den übrigen Plätzen sowie des Temperaturniveaus in der gesamten Kabine. Die Periodizität der Wärmelastverteilung wird deutlich wieder gegeben.

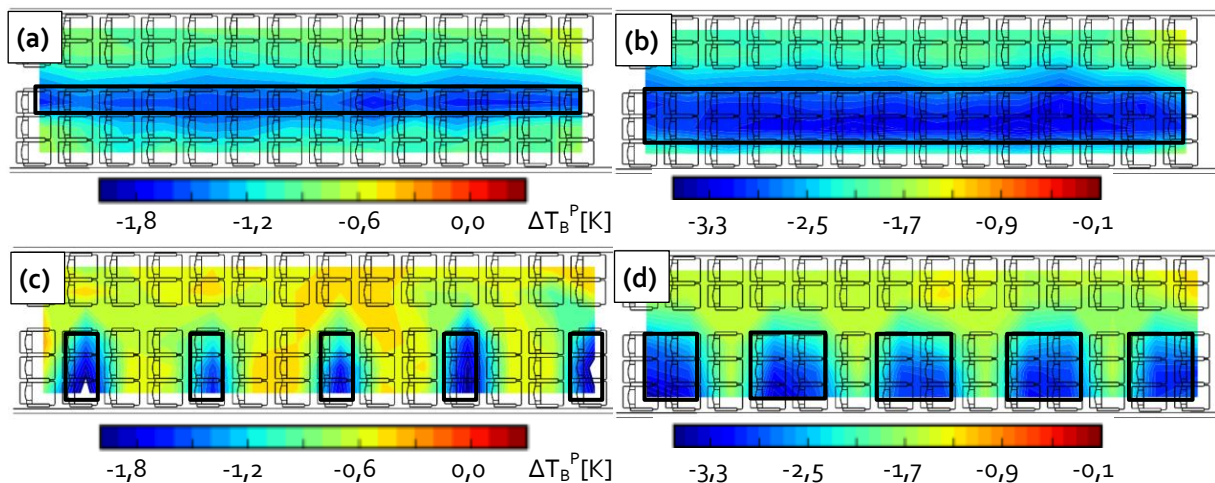


Abbildung 15: Änderung der Fluidtemperaturen auf Brusthöhe für das Klimaszenario CCDV-50-50 und die Fälle 1 (a), 2 (b), 3 (c) sowie 4 (d). Die schwarzen Rahmen kennzeichnen die ausgeschalteten Passagiermodelle.

Die Änderungen der Fluidtemperaturen vor den TPDs zeigen deutliche Unterschiede zwischen den impulsgetriebenen (Abbildung 16 (a) – (b)) und den konvektionsgetriebenen (Abbildung 16 (c) – (e)) Belüftungsvarianten. Während für CDV und die kombinierten Fälle ((c) – (e)) ein geringer Einfluss auf die angrenzenden Positionen beobachtet wurde, führen die fehlenden Wärmelasten bei MV und CCDV zu „cold“ und „hot-spots“ auf den angrenzenden Sitzplätzen.

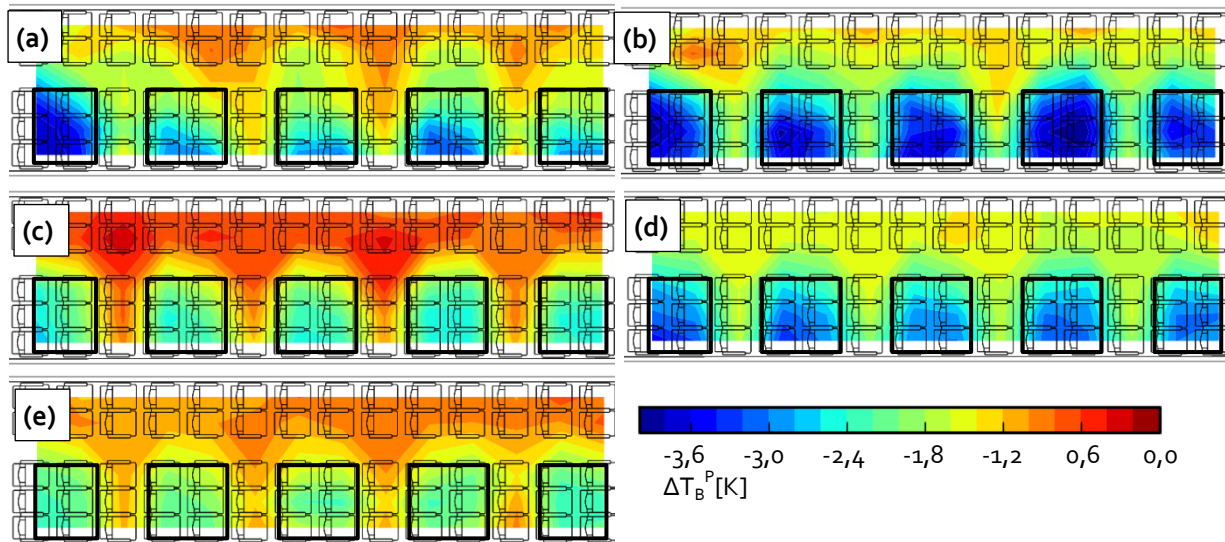


Abbildung 16: Änderung der Fluidtemperaturen auf Brusthöhe für den Fall 3 und die Klimaszenarios MV (a), CCDV (b), CCDV-67-33 (67% CCDV / 33% CDV)(c), CCDV-50-50 (50% CCDV / 50% CDV)(d) und CDV (e). Die schwarzen Rahmen kennzeichnen die ausgeschalteten Passagiermodelle.

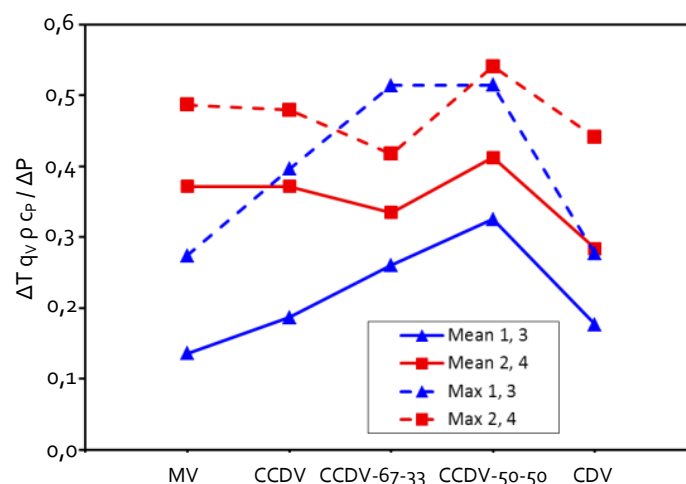


Abbildung 17: Normierte Temperaturänderungen im Passagierbereich, gemessen in Reihe 7, 8 und 9 auf vier Niveaus (Knöchel, Knie, Brust, Kopf), für die verschiedenen Klimaszenarien. Es wurden die Fälle 1 und 3 sowie 2 und 4 zusammengefasst. Dargestellt sind die mittleren Änderungen der lokalen Temperaturen sowie die maximal auftretenden Temperaturänderungen.

Für den Reisekomfort der Flugpassagiere ist in erster Linie die Lufttemperatur im Passagierbereich von Bedeutung. Für die Wärme in der Kabine existieren jedoch zahlreiche weitere Reservoirs, wie etwa die Luft im Gangbereich oder die Oberflächen und Schäume, in die bzw. von denen Wärme transferiert werden kann. Da sich die Transferraten zwischen diesen Reservoirs für die untersuchten Belüftungssysteme deutlich unterscheiden, ändern sich auch die durch das Ausschalten von Wärmelasten indizierten lokalen Temperaturänderungen im Passagierbereich. Eine Übersicht der Änderung der mittleren Lufttemperatur im Passagierbereich an den an den Plätzen, an denen keine Änderung der Wärmelast vorgenommen wurde, ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Temperaturänderungen sind hierbei mit dem Massenstrom, der Wärmekapazität der Luft und der Wärmelaständerung dimensionslos aufgetragen. Es fällt zunächst auf, dass die Datenpunkte für die

verschiedenen Wärmelaständerungen nicht zusammenfallen. Ferner kann auch keine direkte Skalierung mit der HRE, die von MV bis CDV kontinuierlich zunimmt, beobachtet werden. Maßgeblich für den Einfluss der Temperatur- und Strömungsverteilungen sind offenbar viel mehr die dynamische Wechselwirkung der Auftriebs- und Trägheitskräfte bzw. deren Änderungen sowie die Positionen der geänderten Wärmelasten.

Die Temperaturänderungen sind hierbei im Mittel bei CDV am geringsten, danach folgen MV, CCDV und CCDV-67-33. CCDV-50-50 weist die größte Empfindlichkeit bzgl. geänderter Thermalrandbedingungen auf die Temperaturen im Passagierbereich auf. Bei den eher Trägheitskraftgetriebenen Klimaszenarien MV und CCDV zeigt sich eine hohe Stabilität bei geringen Wärmelaständerungen (Fall 1 und 3, entsprechend einer Änderung um 1 TPD pro Reihe), die aber bei größeren Wärmelaständerungen (Fall 2 und 4, entsprechend einer Änderung um 2 TPD pro Reihe) zu einer eher geringen Stabilität „kippt“.

Der Fall CCDV-67-33 stellt, ähnlich wie beim Vergleich der statischen Klimaparameter (siehe [18]), einen guten Kompromiss zwischen den Auftriebs- und den Trägheitskraft-dominierten Belüftungssystemen dar und bleibt damit eines der vielversprechendsten alternativen Lüftungskonzepte auch unter Berücksichtigung nicht-idealer Randbedingungen.

2.1.2.2 AP2.2 Dynamisches Verhalten von Belüftungssystemen

Die in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse wurden auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2015 in Rostock vorgetragen und in dem entsprechenden Konferenzband publiziert, siehe [1] in Abschnitt 2.4. Im Folgenden geben wir einen kurzen, exemplarischen Einblick in die erzielten Ergebnisse.

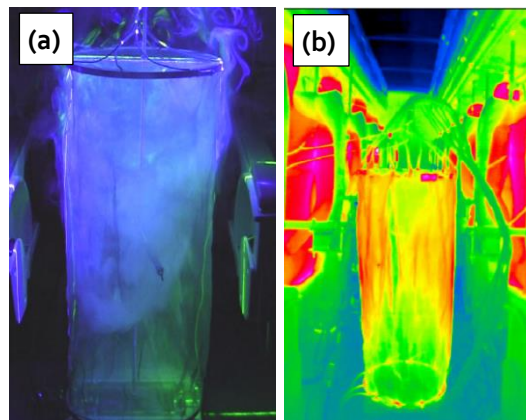


Abbildung 18: Lokale, beheizte Wärmequelle im Gang des Do 728 Versuchsträgers dargestellt (a) in freier Konvektion durch Laser- Rauch- Visualisierung mittels 2-Farben Laser Lichtschnitt und (b) mittels Infrarot-Thermografie.

Ergänzend zu den im Rahmen des DIANA Verbundprojektes durchgeführten Untersuchungen der Ausbreitung lokaler Wärmelasten bei Mischlüftung und deckenseitiger Verdrängungslüftung [1] zielte dieses AP auf die entsprechenden Experimente für Quelllüftung. Hierzu kam wieder die lokale Wärmequelle (Abbildung 18) zum Einsatz, die in der 9. Sitzreihe positioniert und periodisch mit einer Periodendauer von 600 s und einem Arbeitszyklus von 300 s betrieben wurde. Ausgewertet wurde wieder das Extremum $R_{S_n R}^{ex}$ der Kreuzkorrelation der lokalen Sensorsignale S_n mit dem normierten

Signalen der Sensoren an der Wärmequelle R. Details zur Mess- und Auswertemethodik sind in der Publikation [2] aus Abschnitt 2.4 dokumentiert.

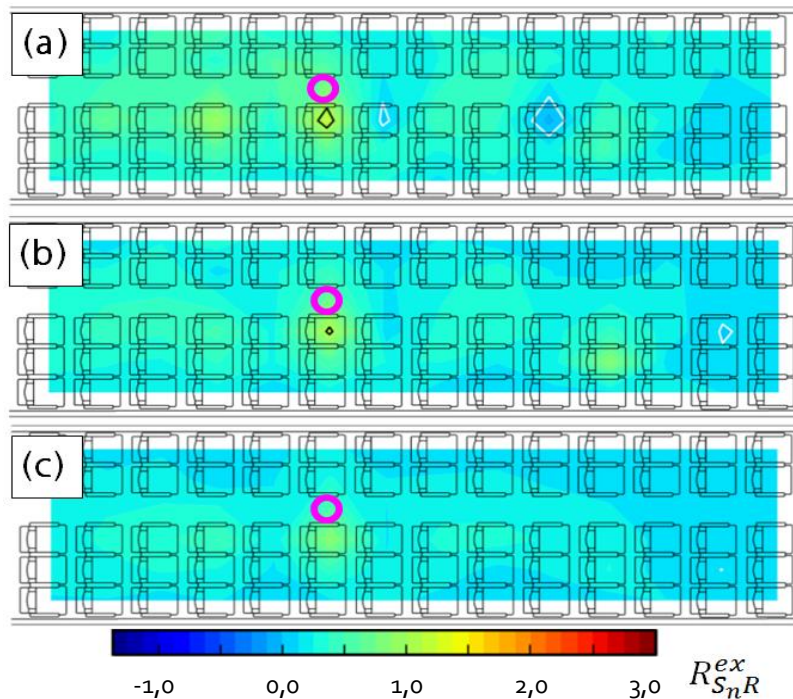


Abbildung 19: Extremum der Kreuzkorrelation der Temperaturen auf Brusthöhe in Dummynähe, $R_{S_n R}^{ex}$, für Quelllüftung. Der Kreis (magenta) kennzeichnet die Position der lokalen Wärmequelle. Deren nominale Leistung betrug (a) 100 W, (b) 200 W und (c) 400 W. Die Details der Auswertesystematik sind in [2] aus Abschnitt 2.4 erläutert.

In Abbildung 19 sind die entsprechenden Werte für die Temperatursensoren in der Luft auf Brusthöhe vor den Passagiermodellen als Konturplot für drei verschiedene nominelle Heizleistungen dargestellt. Im Unterschied zu Mischlüftung und deckenseitiger Quelllüftung ist bei reiner Quelllüftung selbst bei der höchsten Heizleistung fast keine Beeinflussung der Temperaturen durch die eingebrachte Wärmelast zu erkennen. Einzig eine räumlich sehr homogene leichte Erhöhung ist zu beobachten, die aus der Tatsache, dass die Kühlleistung, die die Wärmequelle aus dem Frischluftsee anzieht, den übrigen Wärmelasten nicht zur Verfügung steht, resultiert.

Um einen Vergleich mit den anderen Belüftungsvarianten zu erlauben, sind in Abbildung 20 die entsprechenden Diagramme dargestellt. Während bei MV und CCDV eine lokal stark begrenzte Wärmeausbreitung in die angrenzenden Reihen beobachtet werden kann, dehnt sich dieser Bereich der lokalen Temperaturerhöhung bei Übergang zu den konvektionsgetriebenen Lüftungsvarianten immer weiter aus bis er im Fall der CDV schließlich den gesamten Kabinenbereich umfasst. Im Übergangsbereich bei CCDV-67-33 werden dabei in Längsrichtung periodische Temperaturosillationen beobachtet, die nach unserer Einschätzung auf sich ausbildende großskalige Rollenstrukturen im Gangbereich in Kabinenlängsrichtung hinweisen. Der direkte Nachweis dieser Strukturen steht noch aus.

Hinsichtlich der Stabilität in Bezug auf zusätzliche Wärmelasten im Gangbereich treten auf der einen Seite MV und CCDV mit einer starken Lokalisierung der eingebrachten Wärmelast sowie auf der anderen Seite CDV mit einer extrem gleichmäßigen Verteilung der eingebrachten Wärme hervor. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Effekt bei CDV auf der Attraktion von Kühlleistung

durch die lokale Wärmelast und nicht etwa auf der homogenen Verteilung von Luft in der Kabine beruht. Eine solche könnte bei den hybriden CCDV/CDV Varianten auftreten – dies wäre durch dedizierte Spurengasmessungen in zukünftigen Projekten zu adressieren.

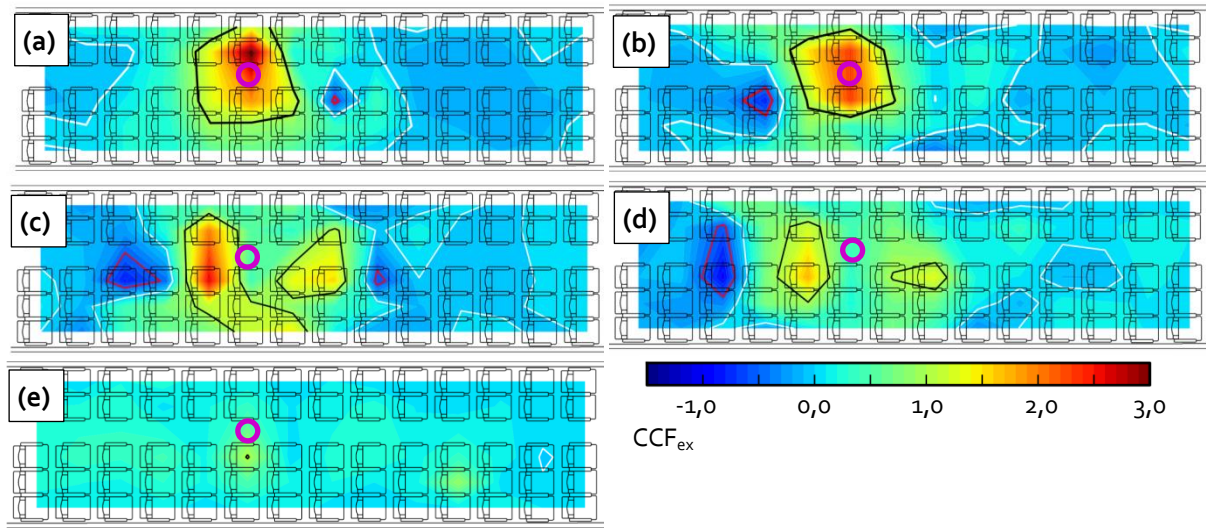


Abbildung 20: Extremum der Kreuzkorrelation der Temperaturen auf Brusthöhe in Passagiermodellnähe, $R_{S_n R_i}^{ex}$ für (a) MV, (b) CCDV, (c) CCDV-67-33, (d) CCDV-50-50 und (e) CDV. Die nominale Leistung der Wärmequelle (Kreis, magenta) betrug 200 W. Die Details der Auswertesystematik sind in [2] aus Abschnitt 2.4 erläutert. Änderung der Fluidtemperaturen auf Brusthöhe für den Fall 3 und die Klimaszenarios. Die Isolinen beziehen sich auf die Werte -1.0 (rot), 0.0 (weiß) und 1.0 (schwarz).

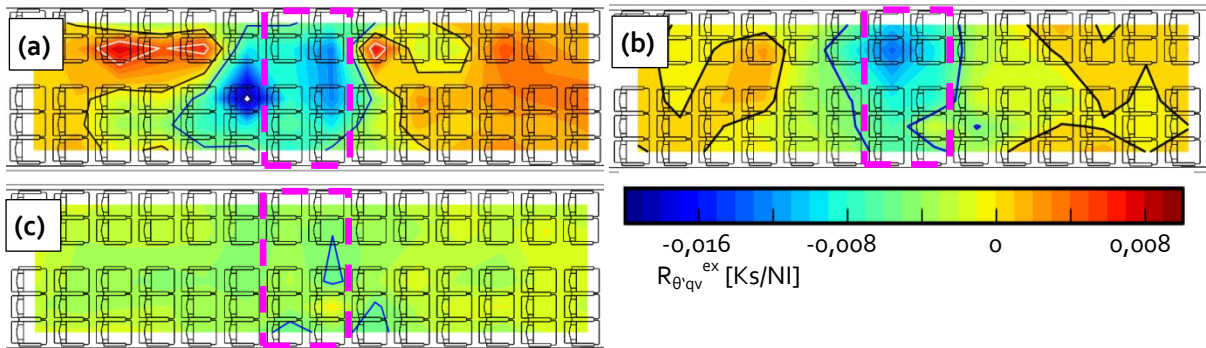


Abbildung 21: Extremum der Kreuzkorrelationsfunktion aus Volumenstrom- und Temperaturvariation für die Temperatursensoren auf Brusthöhe in Passagiermodellnähe als Funktion vom Sitzplatz für (a) MV, (b) CCDV und (c) CDV. Die Isolinen beziehen sich auf die Werte 0.008 (weiß), 0.0 (schwarz) und -0.008 (blau). Das modifizierte Segment mit periodischer Volumenstromänderung ist durch die magentafarbenen Rechtecke gekennzeichnet.

Analog zu den in der vorangegangenen Studie durchgeführten Untersuchungen der Ausbreitung lokaler Impulsquellen bei MV und CCDV wurde der Einfluss eines lokal zeitlich veränderlichen Einstromvolumenstroms auf die Temperaturverteilung in der Do 728 Kabine untersucht. Hierfür wurden Messreihen mit periodischer und sprunghafter Änderung des Volumenstromes in einem modifizierten Segment (magentafarbenes Rechteck in Abbildung 21) durchgeführt. Die lokalen Volumenströme wurden dabei mit einer Periode von 600 s um $\pm 25\%$ variiert [1]. Die Verteilung des ersten Extremums $R_{\theta'qv}^{ex}$ der Kreuzkorrelationsfunktion unter den Sensoren auf Brusthöhe in Passa-

giermodellnähe ist in Abbildung 21 (c) für CDV dargestellt. Abbildung 21 (a) und (b) zeigen zum Vergleich die Ergebnisse aus der vorangegangenen Studie [1] für MV und CCDV. Lokale, periodische Veränderungen des Zuluftvolumenstroms führen bei CDV, anders als bei MV und CCDV nicht zu lokal veränderlichen Kühlleistungen sondern lediglich zu einer globalen, gleichmäßigen Veränderung der Kühlleistung, die über den Frischluftsee vermittelt wird. Bei konstant veränderten Volumenströmen kann es dagegen durch lokales Auskühlen bzw. Aufheizen des Bodens zu veränderten Verlustleistungen und daher zu einer veränderten Kühlleistung kommen.

Mit dem Ziel der Kompensation ungleichmäßig verteilter Wärmelasten oder ungleichmäßiger Randbedingungen durch lokale Variation der Einströmtemperatur bei MV wurden Untersuchungen der Ausbreitung lokal veränderlicher Enthalpieströme durch periodische Temperaturvariationen durchgeführt. Das Ergebnis mit periodischer Temperaturvariation von $\pm 0,5$ K und $\pm 1,0$ K im mittleren Segment (Reihe 7 + 8) zeigt Abbildung 22.

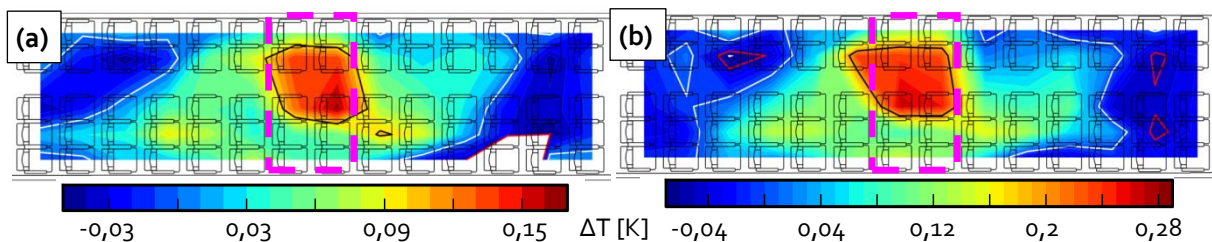


Abbildung 22: Ausbreitung lokal veränderlicher Enthalpieströme durch periodische Temperaturvariation der Zuluft in einem Segment bei MV für (a) $\pm 0,5$ K und (b) $\pm 1,0$ K. Das modifizierte Segment ist mit dem magenta Rechteck gekennzeichnet. Die roten und weißen Isolinien beziehen sich in beiden Messungen auf die Werte -0,05 (rot) und 0,0 (weiß). Die schwarzen Isolinien in a) auf 0,1 und in b) auf 0,2.

In beiden Fällen führt die geänderte Zulufttemperatur im modifizierten Segment (Sitzreihen 7 und 8) zu überwiegend lokalen Temperaturänderungen. Dies ist eine Voraussetzung für die Umsetzbarkeit der „SmartVentilation“ auf Basis von MV. Inwiefern die vorhandenen schwach ausgeprägten nichtlokalen Temperaturänderungen durch mehrere Klimazonen kompensierbar sind, ist Gegenstand von AP2.3, das im folgenden Abschnitt diskutiert wird.

2.1.2.3 AP2.3 Verifikation am Demonstrationsaufbau

Die in diesem Arbeitspaket erzielten Ergebnisse werden auf der Roomventilation Konferenz 2018 in Espoo, Finnland vorgetragen sowie in dem entsprechenden Konferenzband publiziert, siehe [6] in Abschnitt 2.4. Für einen kompletten Überblick sowie weitere Details und Einzelheiten verweisen wir auf diese Literaturstelle.

Ziel dieses Arbeitspaketes war der Nachweis, dass sich mit der entwickelten Klimazonenautomatik unter repräsentativen Lastfällen eine deutliche Verbesserung der Temperaturhomogenität erreichen lässt. Angestrebt war hierbei eine Temperaturhomogenität von besser als $\pm 0,5^\circ$ vom jeweiligen Spaltenmittelwert bei Antwortzeiten von etwa drei Luftwechselraten. Dabei sollte die Anzahl der Temperatursensoren bzw. -kanäle auf maximal 1 pro Passagier begrenzt bleiben.

Zur Bewertung verschiedener Sensornetzwerke und Regelkonzepte wurden neben der voll besetzten Kabine insgesamt sechs repräsentative Lastfälle definiert, u.a. mit einer Wärmelast im Gang. Als Vergleichsfall diente der Fall homogener Einströmtemperaturen, der sich mit der Klimazonenautomatik elegant erreichen lässt. Zu bemerken ist hierbei jedoch, dass dieser Fall gegenüber

der realen Kabine mit deutlichen Abweichungen der Einströmtemperaturen zwischen unterschiedlichen Luftauslässen bereits eine Idealisierung darstellt. Die tatsächlich erreichbaren Verbesserungen der Temperaturhomogenität dürften daher deutlich höher sein als durch den Vergleich mit dem Fall homogener Einströmtemperaturen indiziert.

Dem messtechnischen Nachweis der lokalen Wärmelastverteilung kommt bei der Umsetzung der Klimazonenautomatik eine entscheidende Rolle zu. Der folgende Abschnitt fokussiert daher auf die Entwicklung der eingesetzten Sensor- und Sensornetzwerkkonzepte bevor im zweiten Abschnitt die Validierung an den definierten Testfällen diskutiert wird.

2.1.2.3.1 AP2.3.1 Erarbeitung von Sensor- und Sensornetzwerkkonzepten

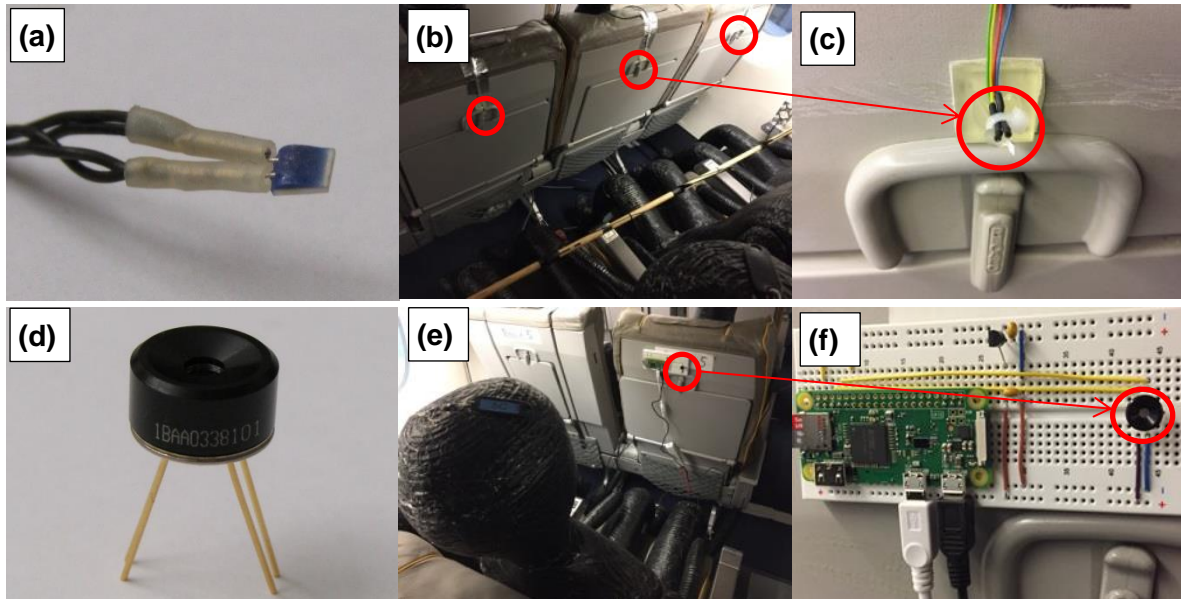


Abbildung 23: (a) Detailansicht des Pt100 Sensors (1/3 DIN B), (b) Pt100- Regelsensoren an Rücklehne zur Detektion fehlender Passagiere, (c) Detailansicht eines Regelsensors mit Halterung, (d) Detailansicht des Infrarotsensors, (e) Infrarotsensor zur Detektion lokaler Wärmelasten angebracht an der Rücklehne Position „LG“ und (f) Detailansicht des Infrarotsensors mit Einplatinen-Computer.

Ziel dieses Unterarbeitspaketes war die Entwicklung und der Test von Sensornetzwerkkonzepten, die es erlauben mit einer gegenüber der kompletten Do 728 Sensorinstallation, die mehrere hundert Messstellen umfasst, deutlich reduzierten Sensoranzahl lokale Abweichungen von einer gleichmäßigen Wärmelastverteilung zuverlässig zu erfassen. Angestrebt wurde hierbei eine Sensoranzahl von max. 1 Sensor pro PAX. Die durchgeführten Untersuchungen fußen auf den Ergebnissen zur Ausbreitung von Wärmelasten in der Zuluft bei MV in AP2.2, siehe Abschnitt 2.1.2.2. Es wurden insgesamt drei verschiedene Sensorkonzepte zur Detektion lokaler Wärmelasten untersucht. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Das erste Konzept zielt auf die Lokalisierung der Wärmelasten in der Abluftströmung durch längenmittelnde Temperaturerfassung. Da längenmittelnde Temperatursensoren mit den hier erforderlichen Abmessungen von ~0,5 m im Handel nicht verfügbar waren, wurden entsprechende Sensoren selbst hergestellt. Hierfür wurde Platindraht (Durchmesser: 0,025mm) auf dünne Balsaholzstäbe (Durchmesser: 8 mm) gewickelt. Das Wickeln des Drahtes erlaubte es, hinreichend viel Platin aufzubringen, um etwa 100 Ohm Widerstand zu erreichen. Balsaholz als Träger stellte sich aufgrund der geringen Wärmekapazität als ideal heraus, da es eine schnelle Ansprechzeit gewähr-

leistet. Das zweite Sensorkonzept besteht aus einem Netzwerk aus punktuellen Temperatursensoren, die an repräsentativen Positionen platziert wurden (Abbildung 23 (a),(b),(c)). Vorteile dieser Variante sind eine einfache Installation und ein schnelles Zeitverhalten. Nachteil der punktuellen Messungen war in bisherigen Untersuchungen ihre Anfälligkeit für „blind-spots“. Das dritte Sensorkonzept beinhaltet integrierte, ortsauflösende Infrarot-Sensoren zur Lokalisierung fehlender Wärmelasten mittels berührungsloser Infrarotthermografie, siehe Abbildung 23 (d),(e) und (f).

Zur Bewertung der unterschiedlichen Sensorkonzepte wurden die in Abbildung 24 dargestellten Referenzlastfälle untersucht. Insbesondere wurde durch die Szenarien 6 und 7 sichergestellt, dass kein Übersprechen zwischen den einzelnen Sitzreihen stattfindet.

Ziel der längenmittelnden Sensoren war es, den lokalen Wärmeeintrag über den Enthalpiestrom der hälftigen Sitzreihe indirekt über die mittleren Ausströmtemperaturen unterhalb der DADO-Paneelen nachzuweisen. Es zeigte sich jedoch, dass das Signal-zu-Rausch Verhältnis dieser Sensoren dicht an der Auflösungsschwelle ist. Der Grund hierfür liegt aus unserer Sicht in der unvollständigen Durchmischung der Wärmeströme in der Kabinenluft (!). Dies führt entweder dazu, dass prozentual nur ein sehr kleiner Anteil des Pt-Drahtes überhaupt eine Temperaturänderung erfährt, so dass die Temperaturänderung gemittelt über den gesamten Draht an der Auflösungsgrenze liegt, oder sogar dazu, dass die Wärme die Kabine ober- oder unterhalb des Sensors die Kabine verlassen kann ohne den Sensor überhaupt zu umströmen. Dieses Konzept wurde daher wieder verworfen.

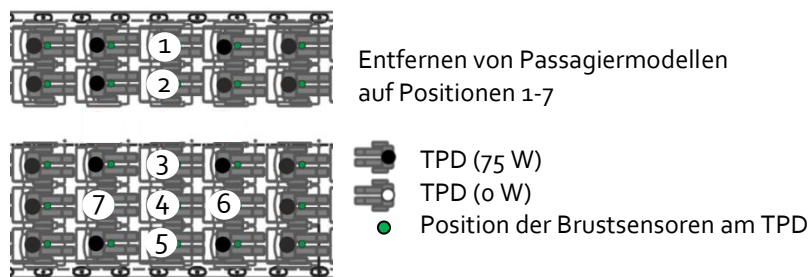


Abbildung 24: Definition der Referenzlastfälle zur Identifizierung optimaler Sensorpositionen

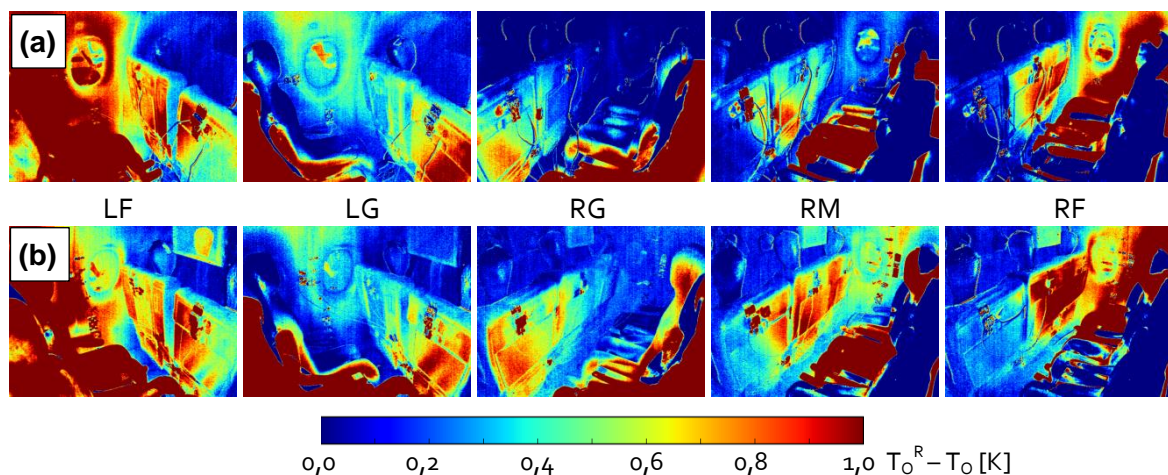


Abbildung 25: Änderungen der Oberflächentemperaturen in der Kabine bei den Referenzlastfällen (1) bis (5) an den Sitzpositionen „LF“, „LG“, „RG“, „RM“ und „RF“ untersucht mittels Infrarotthermografie in (a) Reihe 5 und (b) Reihe 12.

Um sensitivere Sensorpositionen zur Erfassung fehlender oder zusätzlicher Wärmelasten zu identifizieren, wurde in einem weiteren Schritt deren Einfluss auf die Oberflächen- (mittels Infra-

rotthermografie sowie Flächensensoren) und auf die Umgebungstemperaturen (mittels Fluidtemperatursensoren) ermittelt. Abbildung 25 zeigt hierzu die Temperaturen der Oberflächen T_O relativ zum Referenzfall T_O^R 15 Minuten nach Entfernen des jeweiligen TPDs auf den Positionen 1 bis 5.

Die größte Temperaturänderung entsteht hierbei natürlich auf dem jeweiligen Sitz des fehlenden Passagiermodells. Darüber hinaus konnte aber auch ein sehr deutliches Ansprechen der Temperaturen an der Rückenlehne des jeweiligen Vordersitzes sowie an den Außenpaneelen beobachtet werden, wodurch sich lokal sensitive Sensorposition zur Detektion der lokalen Wärmelasten ergeben. Es zeigte sich, dass die Oberflächentemperaturen selber zu langsam ansprechen, um eine Kompensation innerhalb weniger Luftwechselraten zu erreichen. Um dies zu gewährleisten müssen die Sensoren in die Luft ragen, in unserem Fall wurden sie in einem Abstand von 2 cm von der Sitzlehne befestigt. Dies könnte in zukünftigen Flugzeugen durch entsprechende Einhausungen („mini-Käfig“) an den Rückenlehnen oder eine lokale Absaugung realisiert werden.

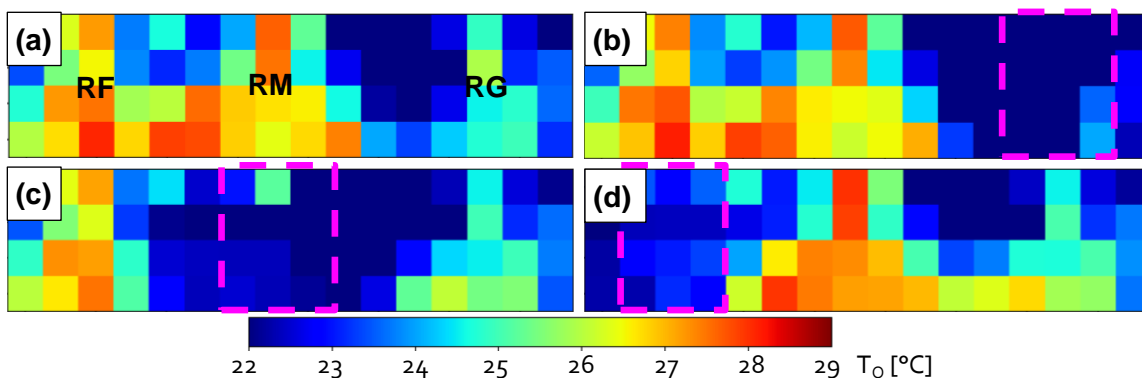


Abbildung 26: (a) Referenzfall mit komplett besetzter Kabine sowie Referenzlastfälle (3) bis (5) entsprechend Abbildung 25 an den Sitzpositionen (b) „RG“, (c) „RM“ (d) und „RF“ untersucht mittels Infrarotsensoren in Reihe 5. Das fehlende TPD ist mit dem magentafarbenen Rechteck gekennzeichnet.

Als dritte Möglichkeit, die lokalen Wärmelastverteilungen zu detektieren wurden Infrarotsensorenarrays (sogenannte „Thermopile- Arrays“) eingesetzt. Diese wiesen eine Auflösung von 16×4 Pixeln auf und sind nicht zuletzt aufgrund der geringen Abmessungen von $9,3 \times 5,5$ mm sowie einer Leistungsaufnahme von max. 23 mW für den avisierten Einsatz attraktiv. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurden sie mit einem Einplatinen-Computer auf einer Experimentierplatine an der Rückenlehne des Vordersitzes montiert. siehe Abbildung 23 (f). Aufgrund des großen Öffnungswinkels ($120^{\circ} \times 25^{\circ}$) konnte mit jeweils einem Sensor in der 3er Reihe (Mittelplatz) und einem in der 2er Reihe (Gangplatz) der komplette Querschnitt der Kabine auf Sitzhöhe (Kopf – Bauch) detektiert werden. Der Referenzfall mit 3 TPDs („RF“, „RM“, „RG“) ist in Abbildung 26 (a) dargestellt. Eine kühlere Oberflächentemperatur des TPD an Sitzposition „RG“ durch die einströmende, kalte Frischluft wird deutlich wiedergegeben. Die folgenden Abbildungen 26 (b) - (d) demonstrieren die Möglichkeit zur Detektion fehlender TPDs durch deutliche Temperaturänderungen auf den einzelnen Sitzen. Zusätzliche Personen im Gangbereich werden ebenfalls zuverlässig detektiert.

Zusammenfassend wurden zwei Sensornetzwerkkonzepte entwickelt, die eine sensitive und lokal selektive Detektion fehlender oder zusätzlicher Wärmelasten in der Kabine erlauben. Die folgenden Untersuchungen basieren auf dem Netzwerk der lokalen Lufttemperatursensoren an den Rückenlehnen. Für die industrielle Umsetzung sehen die Autoren großes Potential vor allem in der Kombination von lokalen Temperatursensoren, Infrarotsensor-Arrays und Sitzbelegungssensoren, um die Wärmelastverteilung der Kabine sicher einschätzen zu können.

2.1.2.3.2 AP2.3.2 Verifizierung und Validierung von Sensornetzwerken, Verifikation der „Smart Ventilation“ am Demonstrationsaufbau

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Wirksamkeit des final eingesetzten Sensornetzwerks in der kompletten Kabine anhand dedizierter Referenzlastfälle zu validieren und den Funktionsnachweis der „Smart Ventilation“ zu erbringen. Hierbei wurde das in Abschnitt 2.1.2.3.1 entwickelte Sensorkonzept 2, bestehend aus jeweils 5 Regelsensoren pro Reihe, in der gesamten Kabine eingesetzt. Die Regelsensoren waren dabei an der Rückseite der Sitzlehnen (Abstand 20 mm / Höhe vom Boden 1050 mm) positioniert.

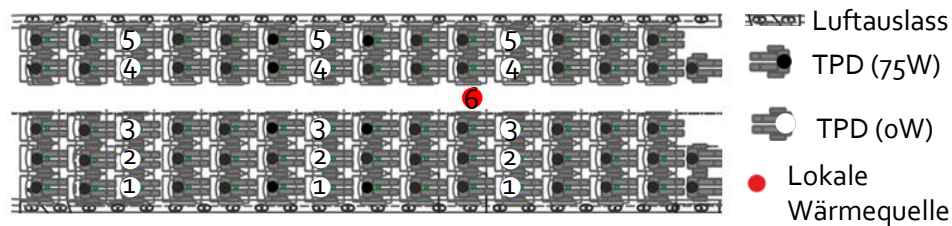


Abbildung 27: Untersuchte Referenzfälle mit fehlenden Wärmelasten (ausgeschaltete TPDs) in Reihe 4, 8 und 12 sowie zusätzlicher Wärmelast im Gang in Reihe 5

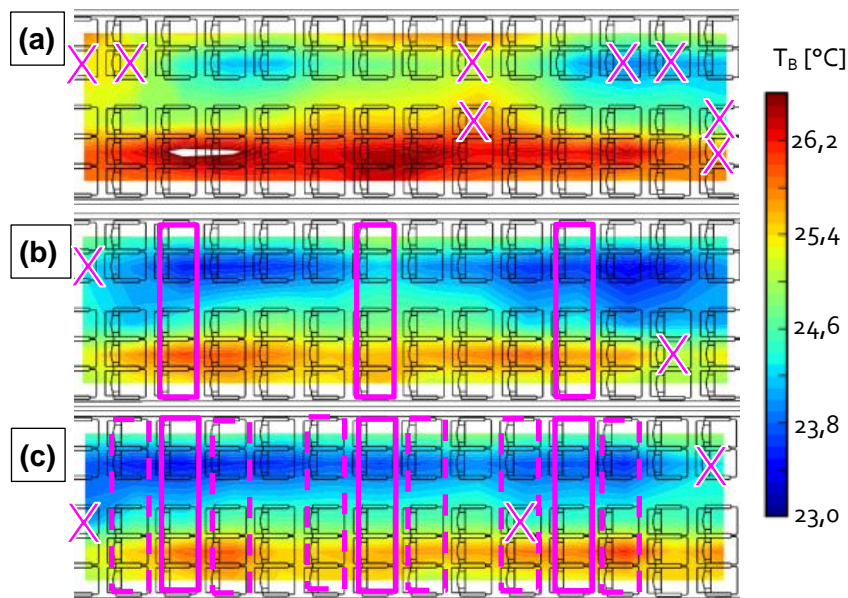


Abbildung 28: Temperaturen auf Brusthöhe in der Nähe der TPDs für die Regeszenarien A (a), B (b) und C (c) beim Referenz-Lastfall (voll besetzte Kabine). Die Sitzpositionen außerhalb der vorgegebenen Toleranz in einer Sitzspalte sind mit einem X (in Magenta) gekennzeichnet.

Als Referenz-Regelszenario (im Folgenden A genannt) wurde der Fall einer räumlich und zeitlich homogenen Einstromtemperatur von 17 °C, gewählt. Auch hierbei war die Klimazonenautomatik aktiv, diese hatte aber die Aufgabe, die Einstromtemperatur zu regeln. Die Regelung erfolgte hierbei auf die in den KLAS installierten Sensoren. Um die im Do 728 Versuchsträger vorhandene leicht versetzte Anordnung von Sitzreihen und Luftauslässen zu kompensieren, wurden im vorderen Bereich drei weitere Passagiermodelle hinzugefügt und ein einzelner Dummy im hinteren Kabinenbereich ausgeschaltet, um das Defizit an Kühlleistung zu kompensieren (siehe Abbildung 27). Dies war erforderlich, um im Referenz-Regelszenario A, also bei gleichmäßiger Einstromtemperatur, auch eine gleichmäßige Kabinentemperatur und damit ein gut definiertes Referenz-Szenario zu erzielen.

Für die aktiv geregelte Kabinentemperatur, d.h. bei Regelung auf die in der Kabine installierten Temperatursensoren, wurden zwei unterschiedliche Regelszenarien mit identischen Sensorpositionen aber unterschiedlicher Mittelung untersucht. Bei Regelszenario B wurde die Temperatur auf den Mittelwert der fünf Sensoren einer Reihe geregelt, in C eine Referenztemperatur aus den Sensoren in der aktuellen Reihe (Gewichtung 50%) sowie den Sensoren der beiden angrenzenden Reihen (Gewichtung 25%) berechnet. Die Szenarien B und C sind in Abbildung 28 durch den Magenta farbigen Rahmen gekennzeichnet.

Neben dem Referenz-Lastfall (o) mit komplett besetzter Kabine wurden fünf verschiedene Lastfälle mit fehlenden Wärmelasten untersucht, in denen TPDs an unterschiedlichen Sitzpositionen ausgeschaltet wurden, siehe Abbildung 27. Um den Einfluss von Passagieren im Gangbereich zu untersuchen, wurde ferner als sechster Lastfall eine zusätzliche Wärmequelle von 100 W im Gang in Reihe 5 positioniert (Abbildung 27).

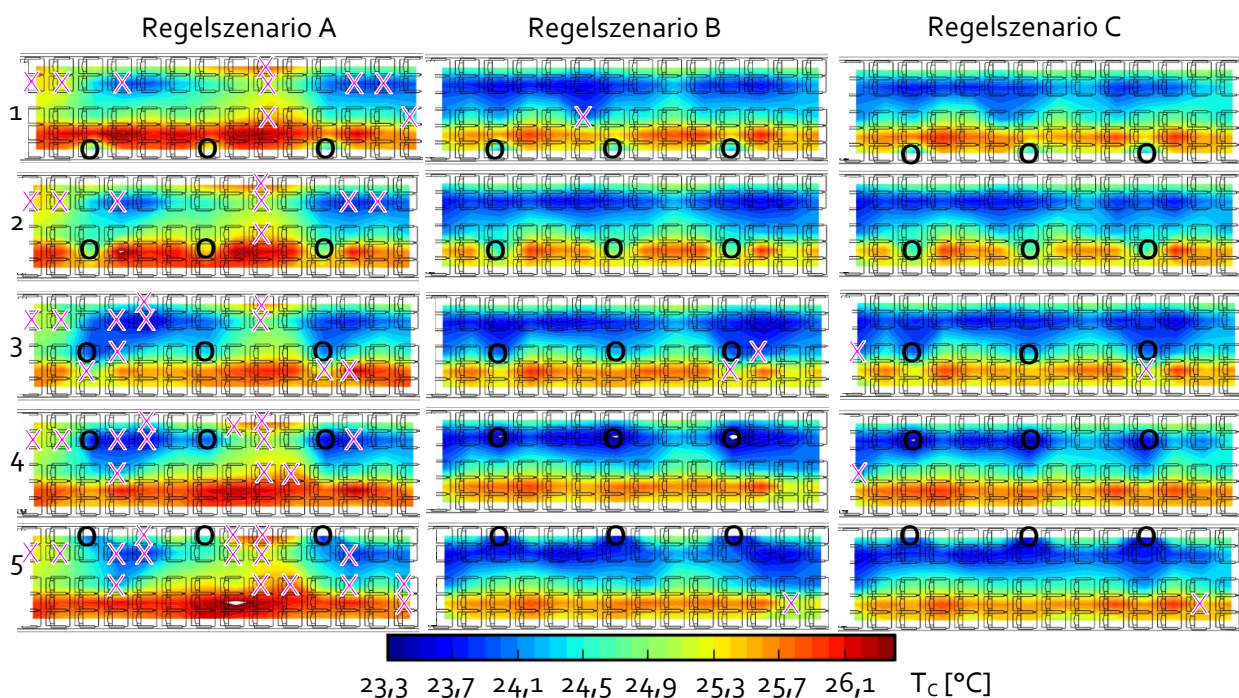


Abbildung 29: Temperaturen auf für die Lastfälle 1 – 5 bei den Regelszenarien A, B und C. Die ausgeschalteten TPDs in Reihe 4, 8 und 12 sind mit schwarzen Kreisen gekennzeichnet. Die Anzahl der Sitzpositionen außerhalb der vorgegebenen Toleranz sind mit „X“ (in Magenta) markiert.

In Abbildung 29 sind die Temperaturverteilungen, gemessen auf Brusthöhe (88 cm), 5 cm vor den TPDs für den Referenz-Lastfall und die verschiedenen Regelszenarien dargestellt. Zu betonen ist hierbei, dass im Folgenden für die Regelung der Kabinentemperatur und die Erfassung der Temperaturverteilung unterschiedliche Sensornetzwerke verwendet wurden. Hintergrund ist der, dass geprüft werden sollte, ob sich durch Regelung auf die an den Rückenlehnen angebrachten Sensoren tatsächlich eine homogene Temperaturverteilung in direkter Passagiernähe erzielen lässt. In allen drei Regelszenarien kann eine charakteristische Temperaturverteilung mit unterschiedlichen Temperaturniveaus für die verschiedenen Sitzspalten (Fenster, Mitte, Gang, etc.) beobachtet werden. Diese beruht auf der spezifischen Kabinengeometrie, die im Fall der Do 728 Kabine bzgl. des Mittelganges unsymmetrisch ist. Die Korrektur dieser Temperaturverteilung ist jedoch nicht Gegenstand dieser Studie. Stattdessen sollen die Temperaturunterschiede auf Plätzen gleicher Sitzspalte in Längsrichtung der Kabine minimiert werden. Im bereits idealisierten Referenz-Lastfall

(Abbildung 28 A) mit homogener Einströmtemperatur und homogen verteilten Wärmelasten werden Abweichungen des Temperaturniveaus innerhalb einzelner Spalten von bis zu 0,82 K vom Mittelwert beobachtet. Zur übersichtlichen visuellen Erfassung wurden in Abbildung 28 diejenigen Sitzplätze mit Temperaturen außerhalb der vorgegebenen Toleranz von $\pm 0,5$ K vom Mittelwert der Spalte mit einem X (Magenta) gekennzeichnet.

Diese Anzahl dieser Sitzplätze konnte mit den Regelszenarien B und C gegenüber dem Referenz-Lastfall von acht auf zwei (max. Abweichung 0,55 K) bzw. drei (max. Abweichung 0,58 K) reduziert werden. Noch eindrucksvoller fällt diese Reduzierung bei den weiteren Lastfällen 1 bis 5, also den Fällen mit unvollständig besetzter Kabine, aus, siehe Abbildung 29. Im Referenz-Regelfall A, also bei homogener Einströmtemperatur, liegen je nach Lastfall zwischen 8 und 18 Sitzplätze (11 % - 26 %) außerhalb der vorgegebenen Toleranz. Durch Verwendung der Klimazonenautomatik, also Regelszenario B und C, konnte die Anzahl auf im Mittel weniger als 1 Sitzplatz in der Do 728 Kabine reduziert werden. Eine möglichst geringe Anzahl der außerhalb der Toleranz liegenden Sitzplätze wird im Folgenden als Gütekriterium herangezogen. Zu bemerken ist hierbei, dass diese definierte Grenze sowie die Erfassung der Temperatur auf Brusthöhe in gewisser Weise willkürlich festgelegt ist. Aufgrund der geringen Temperaturschichtung bei Mischlüftung [18] ist jedoch davon auszugehen, dass die Lufttemperatur auf Brusthöhe ein recht gutes Maß für die Lufttemperatur in der Passagierumgebung darstellt. Eine Validierung der „Smart Ventilation“ mit einer komplett mit Komfortmesspuppen ausgestatteten Kabine wäre dennoch eine höchst wünschenswerte Ergänzung, überschreitet aber den Horizont dieses Projektes. Zu der festgelegten Temperaturtoleranz ist zu sagen, dass diese aus unserer Erfahrung durch Tests mit Probanden insofern eine sinnvolle Schwelle darstellt, da sie von menschlichen Testpersonen bereits deutlich unterschieden werden kann [33].

Zu bemerken ist, dass bei den bisher dargestellten Ergebnissen stationäre Lastfälle untersucht wurden, was der langsamen Abkühlung der thermischen Passagiermodelle geschuldet war. Hierzu wurden die TPDs ausgeschaltet und nach einer Abkühlzeit von 45 Minuten Messwerte über 10 nominelle Luftaustauschraten (900 s) gemittelt.

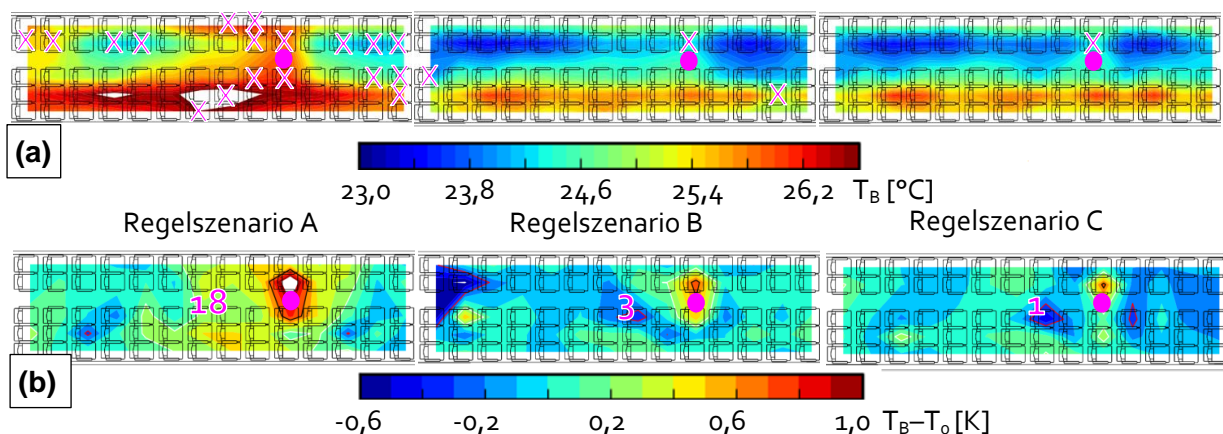


Abbildung 30: Temperaturen auf Brusthöhe für die Regelszenarien A, B und C bei Lastfall 6. Der ausgefüllte, pinke Kreis kennzeichnet die Wärmequellenposition. Dargestellt sind in (a) die Temperaturen und in (b) für eine bessere Vergleichbarkeit, die Temperaturdifferenzen zum eingeschwungenen Zustand vor Einschalten der Wärmequelle (T_0). Die Magenta farbigen Linien markieren die 0,5 K Temperaturgrenze. Die Sitzpositionen außerhalb der vorgegebenen Toleranz sind, wie gehabt, mit „X“ (Magenta) gekennzeichnet (a)). Ferner ist die Anzahl dieser Positionen in b) numerisch angegeben

Der Lastfall 6 mit lokaler Wärmequelle im Gangbereich wurde zunächst ebenfalls unter stationären Bedingungen untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 zusammengefasst. Hierbei sind in (a) die Temperaturen und in (b), für eine bessere Vergleichbarkeit, die Temperaturdifferenzen zum Zustand vor Einschalten der Wärmequelle dargestellt. Die Werte wurden nach einer Einschwingzeit von 25 Minuten über 3,3 Luftaustauschraten (300 s) gemittelt.

Bei einer homogenen Einströmtemperatur (Szenario A) breitet sich die durch die Wärmequelle eingebrachte Wärme deutlich sichtbar aus. Speziell in einem Bereich von ein bis drei Sitzreihen um die Wärmequelle finden sich konzentriert Überschreitungen der Temperaturgrenzen. Dieser Bereich konnte durch die Regelszenarien B und C deutlich verringert werden. Die Anzahl der Sitzplätze außerhalb der vorgegebenen Toleranz konnte von 18 auf ein bzw. drei reduziert werden.

Tabelle 3: Anzahl der Sitzpositionen außerhalb der vorgegebenen Toleranz für 3 Regelszenarien und 7 Lastfälle. Die maximalen Abweichungen sind in Klammern angegeben.

	Last 0	Last 1	Last 2	Last 3	Last 4	Last 5	Last 6	Mittel- wert	Max. Abweichung vom Mittelwert
Regel A	8 (0,82)	9 (0,95)	8 (0,96)	11 (0,92)	12 (0,89)	16 (0,87)	18 (1,10)	11,7	1,1
Regel B	2 (0,55)	1 (0,53)	0	2 (0,64)	0	1 (0,53)	3 (0,52)	1,3	0,64
Regel C	3 (0,58)	0	0	2 (0,65)	1 (0,53)	1 (0,53)	1 (0,61)	1,1	0,65

Die Ergebnisse der unter Verwendung der drei Regelszenarien untersuchten sieben Lastfälle sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Anzahl der Sitzpositionen außerhalb der vorgegebenen Toleranz konnte durch die Klimazonenautomatik (Szenarien B und C) in jedem Lastfall deutlich reduziert werden. Für jeweils 2 Lastfälle wurde das vorgegebene Ziel, eine maximale Toleranz von $\pm 0,5$ K vom Mittelwert der Spalte einzuhalten, erreicht. Für die weiteren Fälle mit fehlenden Wärmelasten wurden maximale Abweichungen von 0,65 K ermittelt, was der Summe der Toleranz und der Messgenauigkeit der verwendeten Sensoren entspricht. Gemittelt über alle Fälle wurde eine Verminderung der mittleren Anzahl von „cold“ und „hot“ spots von 11,7 (17 %) bei homogener Einströmtemperatur auf 1,3 Sitzplätze (1,9 %) mit Szenario B und 1,1 Sitzplätze (1,6 %) mit Szenario C erreicht [6]. Die Unterschiede des Temperaturniveaus in den einzelnen Spalten von bis zu 1,1 K zwischen maximaler und minimaler Temperatur konnten auf 0,64 bzw. 0,65 reduziert werden.

Abschließend soll auf das Zeitverhalten des Regelsystems eingegangen werden. Abbildung 31 zeigt für den Lastfall 6, dass das Regelsystem nach Einschalten der Wärmequelle in der Lage ist, die lokalen Temperaturen unverzüglich beizubehalten und Temperaturdrift sowie Überschwinger zu verhindern. Während die Temperaturen auf Brusthöhe in Sitzreihe 5 bei homogener Einströmtemperatur (Abbildung 31 (a)) stetig ansteigen werden sie in den geregelten Fällen (Abbildung 31 (b) und (c)) innerhalb von ein bis zwei Luftwechselraten kompensiert. Es erfolgt kein weiterer Temperaturanstieg.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der entwickelten und am Do 728 Versuchsträger installierten Klimazonenautomatik die Homogenität der Kabinenlufttemperatur signifikant verbessert werden kann. Bei Mittelung über sieben Referenzlastfälle wurde die Anzahl der Plätze mit wahrnehmbaren Abweichungen von der mittleren Spaltentemperatur um eine Größenordnung

reduziert. Die Regelung ist in der Lage, Änderungen der Wärmelastverteilung innerhalb einzelner Luftwechselraten zu kompensieren.

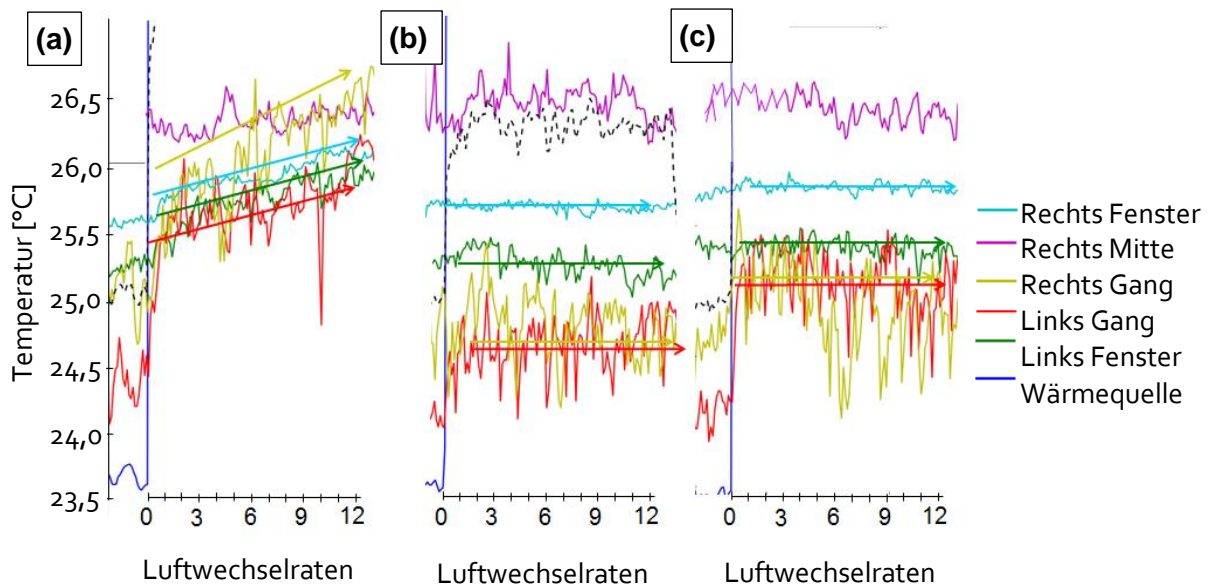


Abbildung 31: Zeitverlauf der Temperaturen auf Brusthöhe in Sitzreihe 5 nach Einschalten der Wärmequelle im Gang (Lastfall 6) auf Höhe von Reihe 5 für die Regelfälle A (a), B (b) und C (c).

2.1.3 TP3 – Beheizbarer Kabinenluftauslass

2.1.3.1 AP3.1 Strömungstechnische Qualifizierung

Gegenstand dieses Arbeitspaketes war neben einer beratenden Funktion bei der Konzeptentwicklung vor allem die strömungstechnische Charakterisierung und Qualifizierung der Luftauslass-Funktionsmuster. Hierfür wurde ein eigener, abgeschlossener Testraum mit den Innenmaßen 3000 x 3000 x 3000 mm³ aufgebaut, der es erlaubte, die Luftauslässe unbeeinflusst durch äußere Raumluftrömungen zu untersuchen.

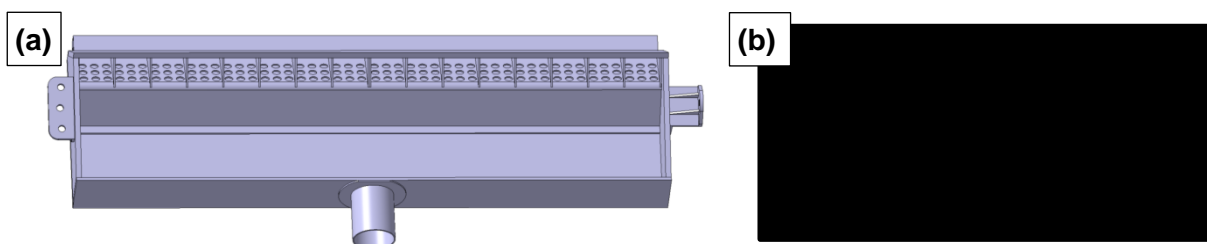


Abbildung 32: (a) Kabinenluftauslass des Do 728 Versuchsträgers und (b) beheizbarer Zuluftstutzen

Neben einem homogenen, möglichst mit dem aktuellen Stand des Luftauslasses des Do 728 Versuchsträgers (Abbildung 32 (a)) vergleichbaren Ausblasprofil, ist ein gleichmäßiger Enthalpieeintrag Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung des Smart Ventilation Prinzips. Hierzu wurden in zwei Nachbauten eines Do 728 KLA verschiedene Positionen und Kombinationen von Positionen zum Betrieb von Heizelementen innerhalb und außerhalb des KLA experimentell untersucht. Im Rahmen dieser vorläufigen Studien zeigte sich, dass die Durchmischung der Luft innerhalb des KLA

nicht ausreicht, um gleichmäßige Temperaturverteilung am Austritt zu ermöglichen. Zusätzlich wurde daher die Möglichkeit für eine Heizung und Durchmischung der Luft vor dem Luftauslass mittels beheizbarer Zuluftstutzen (Abbildung 32 (b)) studiert und anhand von Funktionsmustern untersucht.

Neben dem Zeitverhalten ist die räumliche Homogenität der Temperaturverteilung eine wichtige Kenngröße. Eine Positionierung des beheizten Zuluftstutzens nahe am Auslass führt tendenziell zu einer geringeren Durchmischung der eingebrachten Wärme aber zu einer schnellen zeitlichen Ansprache und geringeren Verlusten. Die entwickelte Anordnung und Dimensionierung der Heizflächen im Inneren des Heizstutzens ermöglicht eine hinreichend homogene Wärmeverteilung bei Positionierung direkt vor den Auslässen und stellt damit eine elegante Möglichkeit zum Retrofit existierender Flotten dar. Die resultierenden Temperaturverteilungen, die sich direkt am Auslass messen lassen, sind für drei verschiedenen hohe Temperatursprünge in Abbildung 33 dargestellt.

Die Sensorpositionen beziehen sich dabei auf die Anordnung in Längsrichtung des Luftauslasses. Die Temperaturprofile sind das Resultat der Verteilung der Flächenheizleistungen auf die verschiedenen Heizelemente. Deutlich ist eine leichte Überhöhung der Temperatur im mittleren Bereich des Luftauslasses zu erkennen. Darüber hinaus ist eine leichte Asymmetrie aufgrund der Wirkung der Schwerkraft auf die warme Luft erkennbar, die in der späteren horizontalen Einbaurichtung jedoch nicht zum Tragen kommt.

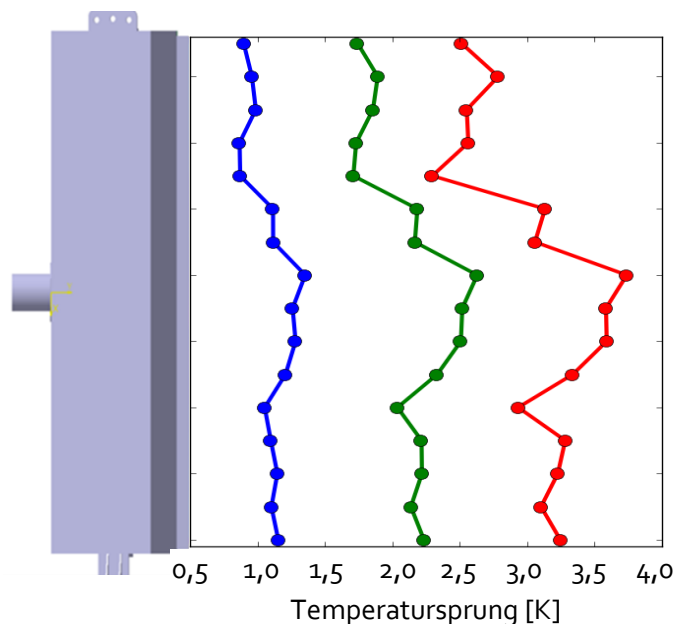


Abbildung 33: Laterale Verteilung der Ausströmtemperaturen am Ausgang des Luftauslasses bei verschiedenen hohen Temperatursprüngen von 1 K (blau), 2 K (grün) und 3 K (rot) gemessen am Ende des Heizstutzens. Der Volumenstrom lag bei 7,5 l/s

Eine gleichmäßige Kühlleistungsänderung in Längsrichtung erfordert eine homogene Änderung des Enthalpiestroms. Dieser skaliert jedoch neben den Temperaturänderungen mit dem Volumenstrom, d.h. die Temperaturprofile in Abbildung 33 sind zu skalieren mit den Ausströmgeschwindigkeiten am Luftauslass. Da der Volumenstrom zu den Rändern des Luftauslasses leicht ansteigt, ist die in der aktuellen Verschaltung der Heizelemente erzielte leichte Mittenüberhöhung des Temperaturprofils ideal, um eine in Längsrichtung gleichmäßige Kühlleistungsänderung zu induzieren. Mit anderen Worten: Die Überhöhung des Temperatursprungs im mittleren Bereich des Luftauslasses

ses signalisiert, unter Berücksichtigung der Verteilung der Ausströmgeschwindigkeiten, eine weitgehend gleichmäßige Enthalpiestromänderung über die gesamte Länge des Luftauslasses.

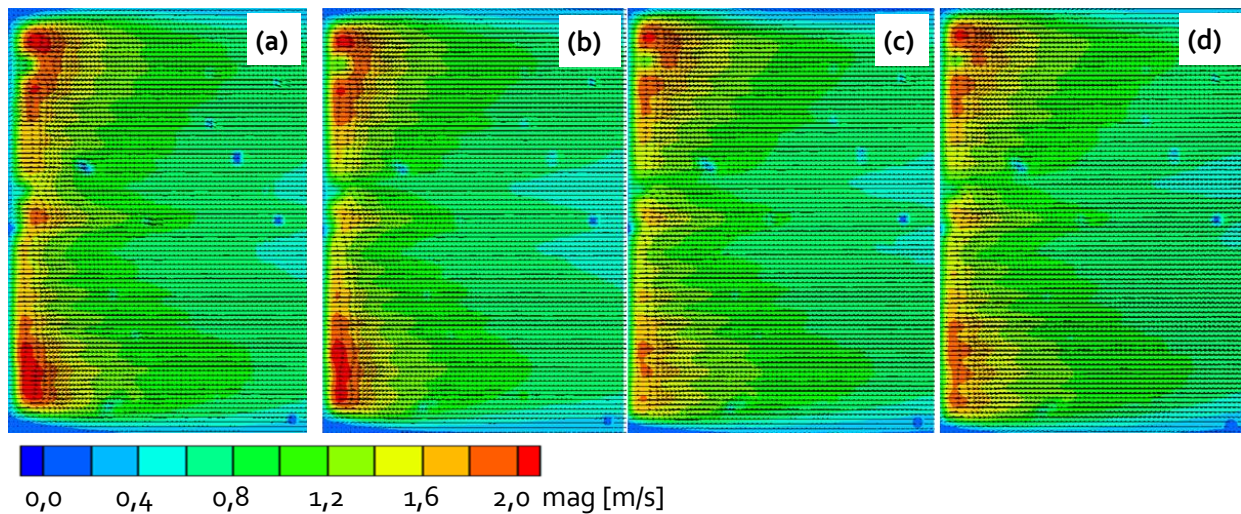


Abbildung 34: Geschwindigkeitsfelder am Do 728 KLA („ceiling“) bei einem Volumenstrom von 6,25 l/s (a) ohne Zuluftstutzen, (b) mit Zuluftstutzen, aber unbeheizt, (c) mit Zuluftstutzen, $P = 52$ W, (d) mit Zuluftstutzen, $P = 104$ W.

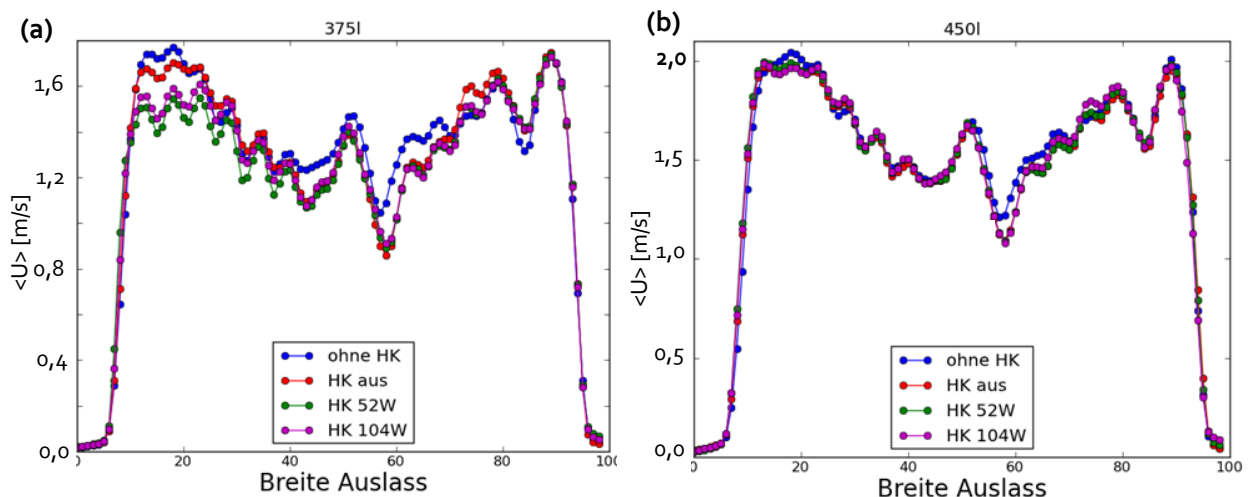


Abbildung 35: Ausströmprofile am Do 728 KLA („ceiling“), an der Auslassöffnung (über eine Breite von 40 mm gemittelt) bei einem Volumenstrom von (a) 6,25 l/s und (b) 7,5 l/s.

Zur Absicherung der geplanten Modifikation des Do 728 Zuluftstranges wurde der Einfluss des beheizbaren Zuluftstutzens auf das Ausströmverhalten der Luftauslässe untersucht. Hierzu wurden die Strömungsfelder in der Symmetrieebene des Ausblaskanals mittels 2C-PIV vermessen, und zwar für den Betrieb ohne vorgeschaltetem Zuluftstutzen, mit eingebautem aber unbeheiztem Zuluftstutzen sowie mit eingebautem und beheiztem Zuluftstutzen bei zwei verschiedenen Heizleistungen. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 dargestellt. Die Untersuchungen wurden bei Volumenströmen von jeweils 6,25 l/s, 6,9 l/s und 7,5 l/s durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss, vor allem bei höheren Ausströmgeschwindigkeiten, vernachlässigbar ist. Die Änderungen, die bei den kleineren Volumenströmen beobachtet wurden, sind im Bereich der ohnehin vorhandenen lateralen Schwankungen und werden daher ebenfalls als unkritisch eingestuft.

2.1.3.2 AP3.2 Integration in Do 728 Versuchsträger

In diesem Arbeitspaket wurde der Do 728 Versuchsträger mit den in AP3.1 qualifizierten beheizbaren Zuluftstutzen sowie der zugehörigen Regelelektronik ausgerüstet und der Funktionsnachweis in der realen Kabinenumgebung erbracht.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde zunächst ein einzelnes Segment umgerüstet. Nach erfolgreichem Test der Hard- und Software in diesem Segment wurde schließlich die komplette Kabine mittels der vom Projektpartner DAC bereitgestellten Zuluftstutzen modifiziert. Für eine optimale Positionierung an den Auslässen wurden für die Decken-KLAs Durchbrüche im Gepäckfach geschnitten. Ferner wurden die Seitenpaneele entfernt, um die Zuluftstutzen hinter der Isolierung an den lateralen Auslässen anzubringen.

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Zuluftstutzen direkt nach dem Einbau, wurde die Temperierung mit einer IR-Kamera überprüft. Abbildung 36 zeigt eine Infrarotaufnahme der Kabinenverkleidung, auf der die lokale Erwärmung durch die beheizten Zuluftstrahlen deutlich zu erkennen ist.

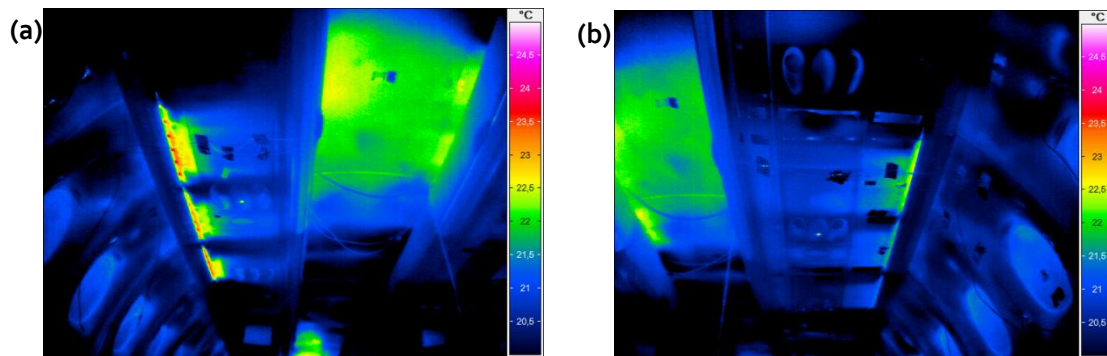


Abbildung 36: Infrarot- Aufnahmen beheiztes Segment in Do 728 a) in Flugrichtung rechts und b) in Flugrichtung links

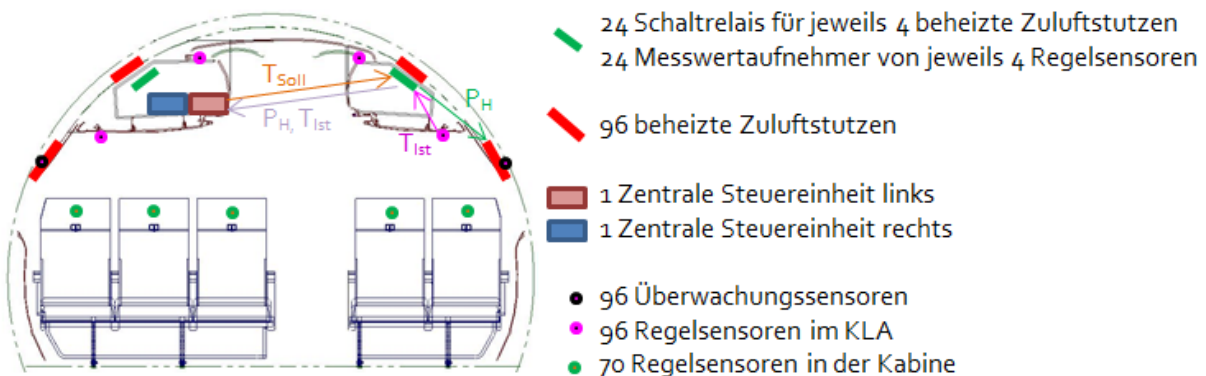


Abbildung 37: Skizze der finalen Installation der 96 beheizten Zuluftstutzen mit 96 Überwachungs-, 96 Regelsensoren im KLA und 70 Regelsensoren an den Rücklehnen in der Kabine sowie 2 zentralen Steuereinheiten und 24 im Gepäckfach montierten Schaltrelais

Um bei der Regelung auf die Temperatur weitestgehend vermischter Luft zu referenzieren und gleichzeitig eine langfristig stabile Installation zu gewährleisten, wurden die Referenzsensoren im Luftauslass positioniert. Die finale Installation umfasst 96 beheizte Zuluftstutzen die über 96 Regelsensoren im Luftauslass unabhängig voneinander einzeln angesteuert werden können.

Um komplexe Temperaturverteilungen zu kompensieren ist alternativ eine Regelung auf bis zu 70 frei in der Kabine positionierbare Temperatursensoren möglich. Ferner beinhaltet der Aufbau 96 Überwachungssensoren sowie 24, im Gepäckfach montierte Schaltrelais. Die Anordnung der Bauteile ist in der Skizze in Abbildung 37 dargestellt.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen

Durch die erreichten Ziele konnten neue wissenschaftliche Impulse in Form von Konferenzbeiträgen und Veröffentlichungen gegeben, und damit die Kompetenz sowie das wissenschaftliche Renommee des DLR weiter ausgebaut werden [1][2][3][4][5][7][8][9].

Dem Industriepartner DAC eröffnen sich durch die Ergebnisse des Vorhabens neue Möglichkeiten, auf die Herausforderungen aktueller und zukünftiger Flugzeuggenerationen mit zwei innovativen Produkten zu reagieren, seine Wettbewerbsposition im internationalen Markt zu stärken und die Beschäftigung von hoch qualifizierten Arbeitskräften in Deutschland zu sichern oder auszubauen. Die Fertigung und das Engineering der neuen innovativen Systeme würden im Falle einer Markteinführung voraussichtlich in Laupheim erfolgen. Die technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projektes dienen damit direkt, durch Akquirierung von Folgeaufträgen und Projekten, und indirekt, durch Wissenstransfer in die Industrie, dem Erhalt und der Sicherung von Arbeitsplätzen und Fachkompetenz in Deutschland.

Die im Rahmen von SINTEG [7] und DIANA [8] begonnen Forschungsarbeiten zur Entwicklung und Erprobung eines Smart Linings wurden im Rahmen von SYLVIA fortgesetzt und intensiviert. Zu Projektende steht ein funktionierender Smart-Lining-Demonstrator zu Verfügung, der die akustische Wirksamkeit unter realitätsnahen Laborbedingungen demonstriert. Ferner konnte der technologische Reifegrad TRL im Rahmen der Aufstockungsarbeiten durch den Einsatz von kommerziell verfügbarer Low-Cost-Hardware erhöht werden. Der Industriepartner DAC hat nun die Option, bei Bedarf, ein solches System relativ kurzfristig zur Serienreife fortzuentwickeln und auf aktuelle oder zukünftige Herausforderungen in Bezug auf die Kabinenakustik mit einem einzigartigen und innovativen Produkt zu reagieren. Durch Beiträge auf nationalen und internationalen Konferenzen und durch eine Patent- [12] und Gebrauchsmusteranmeldung [13] konnte das DLR die Forschungsergebnisse verwerten.

Die in Fortführung der im Rahmen von DIANA begonnenen Studien von Belüftungssystemen unter dynamischen Bedingungen und nicht- idealen Randbedingungen ermöglichte die Erstellung einer umfangreichen Datenbasis bislang in der Literatur nicht untersuchter Strömungsszenarien. Diese erlauben erstmals eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit konventioneller und neuartiger Belüftungskonzepte unter operationell relevanten Bedingungen, wie etwa zusätzliche Personen im Gangbereich, unvollständig besetzte Sitzreihen, ungleichmäßige Einströmtemperaturen und temporär wirksame Wärmelasten.

Die Integration einer multi-Klimazonenautomatik „SmartVentilation“ am Do 728 Versuchsträger auf TRL₄ erlaubt dem Industriepartner DAC, Kunden sowie Entscheidungsträger vor Ort an einem repräsentativen Versuchsträger von den Vorteilen der neuen Technologie vor Ort zu überzeugen und ihren Reifegrad zu demonstrieren. Gleichzeitig bietet die zugrunde liegende Hard- und Softwareinstallation die Möglichkeit, die experimentelle Darstellung und Analyse der Innenraumbelüftung auf bisher nicht erreichbaren Komplexitäts- und Genauigkeitsniveaus durchzuführen. Hierdurch werden positive Impulse bei der Akquise von Drittmitteln und Folgeprojekte Anschlussmöglich-

lichkeiten gesehen. Die Technologie soll zudem auch für ähnliche Versuchsträger im Bereich der Schienen- und Personenfahrzeuge nutzbar gemacht werden, um auch dort die beschriebenen Vorteile darzustellen. Für die multi-Zonale Klimatisierung „SmartVentilation“ wurde gemeinsam mit dem Projektpartner DAc eine Erfindungsmeldung eingereicht [10], die eine Kommerzialisierung bzw. Lizenzierung ermöglicht und absichert.

2.3 Fortschritte bei anderen Stellen

Neue Fortschritte bei anderen Stellen im Bereich der untersuchten Zielstellungen sind den Autoren nicht bekannt.

2.4 Veröffentlichungen und Vorträge

- [1] T. Dehne, J. Bosbach. Performance of novel ventilation systems for passenger aircraft cabins with unsteady and unbalanced heat loads. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress 2015, Rostock, 22.-24. September, 2015
- [2] J. Bosbach, T. Dehne. Propagation of localized, unsteady heat loads in aircraft cabin air flows, *CEAS Aeronautical Journal* **7**, 57-68 (2016)
- [3] T. Dehne, J. Bosbach. Transient temperature fields of turbulent mixed convection in an aircraft cabin caused by a local heat source, in: *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X*, Springer, pp 371-381, 2016
- [4] V. Papantoni, M. Rose, H. P. Monner. Active structural acoustic control and psychoacoustics: A study on different excitation types and actuator placements, ISMA 2016, 19.-21. September 2016, Leuven, Belgien
- [5] M. Misol, T. Haase, S. Algermissen, V. Papantoni, H. P. Monner. Lärmreduktion in Flugzeugen mit aktiven Linings, *Smarte Strukturen und Systeme*, Seiten 329-339. Shaker Verlag. Symposium für Smarte Strukturen und Systeme 4SMARTS, 21.-22. Juni 2017, Braunschweig, Deutschland. ISBN 9783844050837
- [6] T. Dehne, J. Bosbach, T. Lechner, F. Hesselbach. Multi-zonal temperature control of transient thermal loads in aircraft cabin airflow. *Roomventilation*, Espoo, Finland, June 2. – 5. (2018)
- [7] M. Misol, Experiments on noise reduction in aircraft with active sidewall panels, 25th International Congress on Sound and Vibration (ICSV25), 8.-12. Juli 2018, Hiroshima, Japan, ISBN 978-83-7880-552-6, ISSN 2329-3675
- [8] M. Misol, S. Algermissen, M. Rose, On the noise reduction of active sidewall aircraft panels using feedforward control with embedded systems, *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA)*, 17.-19. September 2018, Leuven, Belgien
- [9] M. Misol, S. Algermissen, H. P. Monner, Aircraft lining panels with low-cost hardware for active noise reduction, *Acoustics* 11.-14. September, 2018, Ustka, Polen

2.5 Erfindungsmeldungen

- [10] J. Bosbach, T. Dehne, F. Werner, F. Hesselbach, N. Staudiegel, S. Utikal. Kabinenluft-Einlassmodul und Kabinenluftanlage, DE 10 2017 105 871.0 (angemeldet)
- [11] S. Algermissen, T. Haase, M. Misol, M. Pohl, M. Rose, O. Unruh. Schalldämmungssystem DE 10 2013 102 612 (Patent, erteilt)
- [12] S. Algermissen, T. Haase, M. Misol, M. Pohl, M. Rose, O. Unruh. Schalldämmungssystem 20 2013 012 678 (Gebrauchsmuster abgezweigt aus 10 2013 102 612.5, erteilt)

2.6 Abschlussarbeiten

- [13] P. Lange. Strömungstechnische Qualifizierung von Kabinenluftauslässen, Master-Projekt-Arbeit, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 2016

2.7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Bosbach, M. Misol. Schlussbericht des Vorhabens "Technologien für ein innovatives Luftsystem und ein aktives Lining im Rahmen einer Energie-autarken, intelligenten Kabine", Förderkennzeichen 20K1101E, Report-Nr. 01104945, DLR, Göttingen, 2014
- [2] J. Bosbach. Schlussbericht des Vorhabens „Auslegung und Verifikation neuer Verfahren der Kabinenbelüftung für Verkehrsflugzeuge“, Förderkennzeichen 20Ko8o6D, Report-Nr. 01067253, DLR, Göttingen, 2013
- [3] C. Wagner: Dornier Do 728 Ein Versuchsträger für die Kabinenforschung im DLR, http://www.dlr.de/media/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2007/broschuere_do728.pdf (25.02.2013)
- [4] M. Kühn, J. Bosbach, C. Wagner. Experimental parametric study of forced and mixed convection in a passenger aircraft cabin mock-up, Building and Environment Vol. 44, pp 961-970, 2009
- [5] M. Dechow, C.A.H. Nurcombe. Aircraft Environmental Control Systems, Air Quality in Airplane Cabins and Similar Enclosed Spaces, pp 3-24, Springer, 2005
- [6] E.H. Hunt, D.H. Reid, D.R. Space, F.E. Tilton. Commercial Airliner Environmental Control System, Aerospace Medical Association annual meeting, Anaheim, California, May, 1995
- [7] R.A. Knepple. Die energie-autarke Kabine - das Ende der klassischen Bordnetze, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Berlin, Germany, September 10-12, 2012
- [8] T. Dehne, J. Bosbach, A. Heider. Comparison of surface temperatures and cooling ranges for different ventilation concepts in an airbus a320 aircraft cabin under flight conditions, Roomvent, Sao Paulo, Brazil, October 19-22, 2014
- [9] D. Müller, M. Schmidt, B. Müller Application of a Displacement Ventilation System for Air Distribution in Aircraft Cabins, AST 2011, Hamburg, Germany, March 31 – April 1, 2011
- [10] M. Schmid, D. Müller, I. Gores, M. Markwart. Numerical Study of Different Air Distribution Systems for Aircraft Cabins, 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, Denmark, August 17-22, 2008
- [11] S. Yin, T. Zhang. A New Under-Aisle Displacement Air Distribution System for Wide-Body Aircraft Cabins, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, pp 1030-1036, 2009
- [12] T. Zhang, Q. Chen. Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins, Building and Environment, Vol. 42, pp 1675-1684, 2007
- [13] T. (Tim) Zhang, P. Li, Y. Zhao, and S. Wang, „Various air distribution modes on commercial airplanes. Part 1: Experimental measurement“, HVACR Res., Vol. 19, no. 3, pp. 268–282, Apr. 2013
- [14] T. (Tim) Zhang, P. Li, Y. Zhao, and S. Wang, „Various air distribution modes on commercial airplanes—Part 2: Computational fluid dynamics modeling and validation“, HVACR Res., Vol. 19, no. 5, pp. 457–470, Jul. 2013
- [15] N. P. Gao and J. L. Niu, „Personalized Ventilation for Commercial Aircraft Cabins“, J. Aircr., Vol. 45, no. 2, pp. 508–512, 2008

- [16] J. Bosbach, A. Heider, T. Dehne, M. Markwart, I. Gores, P. Bendfeldt. Evaluation of Cabin Displacement Ventilation under Flight Conditions, 28th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS2012, Brisbane, Australia, September 23-28, 2012, ISBN 978-0-9565333-1-9
- [17] J. Bosbach, A. Heider, T. Dehne, M. Markwart, I. Gores, P. Bendfeldt. Flight Testing of Alternative Ventilation Concepts for Aircraft Cabins, 18. DGLR-Fach-Symposium der STAB, Stuttgart, Germany, November 6.-7, 2012
- [18] J. Bosbach J, S. Lange, T. Dehne, G. Lauenroth, F. Hesselbach, M. Allzeit. Alternative ventilation concepts for aircraft cabins. *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 4, pp 301-313, 2013
- [19] Z. Zhang, X. Chen, S. Mazumdar, T. Zhang, Q. Chen. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup, *Building and Environment*, Vol. 44, pp 85-94, 2009
- [20] IATA. Record Passenger Load Factor in July, <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-09-06-01.aspx>, (16.10.2017)
- [21] P. Bendfeldt, U. Buchholz, I. Gores, C. Köpp, M. Markwart. System und Verfahren zur Klimatisierung zumindest eines Teilbereichs eines Flugzeugs, DE 102007049926 A1, 2009
- [22] D.W. Demetriou, H.E. Khalifa. Evaluation of distributed environmental control systems for improving IAQ and reducing energy consumption in office buildings. *Building Simulation*, Vol. 2, pp 197-214, 2009
- [23] V. Dhummi, D. Demetriou, H.J. Palanthandalam-Madapusi, H.E. Khalifa, C. Isik. Robust Occupancy-Based Distributed Demand Control Ventilation. *International Journal of Ventilation* 9:359-369, 2011
- [24] M. Kühn, J. Bosbach, C. Wagner. Stability of the air flow in a two aisle cabin model, First CEAS European Air and Space Conference, Berlin, Germany, September 10-13, 2007
- [25] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, M. Roma. Numerical investigation of transient thermal and fluidynamic fields in an executive aircraft cabin, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp 3418-3425, 2009
- [26] A. Mangili, M.A. Gendreau. Transmission of infectious diseases during commercial air travel, *The Lancet*, Vol. 365, pp 989-996, 2005
- [27] S. Mazumdar, Q. Chen. Impact of moving bodies on airflow and contaminant transport inside aircraft cabins, *Roomvent*, Helsinki, Finland, 2007
- [28] S. Mazdumar, S.B. Poussou, C.H. Lin, S.S. Isukapalli, M.W. Plesniak, Q. Chen. Impact of scaling and body movement on contaminant transport in airliner cabins, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, pp 6019-6028, 2011
- [29] C. Wu, N.A. Ahmend. Numerical study of transient aircraft cabin flowfield with unsteady air supply, *Journal of Aircraft*, vol. 48, pp1994-2000, 2011
- [30] W. Yan, Y. Zhang, Y. Sun, D. Li. Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up, *Building and Environment*, Vol. 44, pp 34-43, 2009
- [31] J. Wang, T.T. Chow. Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room. *Building and Environment*, Vol. 46, pp 1993-2002, 2011

- [32] C. Wagner. Schlussbericht des Vorhabens „Systeme und Technologien für das Energiemanagement in leistungsoptimierten Flugzeugarchitekturen“, Förderkennzeichen 20Y0907B, Report-Nr. 01075480, DLR Göttingen, 2014
- [33] J. Maier, C. Marggraf-Micheel, T. Dehne, J. Bosbach. Thermal comfort of different displacement ventilation systems in an aircraft passenger cabin. *Building and Environment*, Vol. 111, pp 256-264, 2017
- [34] S. J. Nelson, P. A. Nelson, I. M. Stothers und C. C. Boucher, „In-flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise“, *Journal of Sound and Vibration*, 140 (2), 219–238, 1990
- [35] C. R. Fuller und J. D. Jones, „Experiments on reduction of propeller induced interior noise by active control of cylinder vibration“, *Journal of Sound and Vibration*, 112 (2), 389–395, 1987
- [36] K. H. Lyle und R. J. Silcox, „A study of active trim panels for interior noise reduction in an aircraft fuselage“, SAE Technical Paper, 05, SAE International, 1995
- [37] B. N. Tran und G. P. Mathur, „Aircraft interior noise reduction tests using active trim panels“, *Proceedings of Noise-Con 96*, pp. 395–400, 1996
- [38] S. M. Hirsch, N. E. Meyer, M. A. Westervelt, P. King, F. J. Li, M. V. Petrova und J. Q. Sun, „Experimental study of smart segmented trim panels for aircraft interior noise control“, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 231, no. 4, pp. 1023–1037, 2000
- [39] S. M. Hirsch, J. Q. Sun und M. R. Jolly, „An analytical study of interior noise control using segmented panels“, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 231, no. 4, pp. 1007–1021, 2000
- [40] M. Misol, T. Haase, S. Algermissen und O. Unruh, „Feedforward control of sound transmission through a fuselage structure with active trim panels“, in *Proceedings of Inter-noise 2012*, C. Burroughs and S. Conlon, Eds. The Institute of Noise Control Engineering of the USA, Inc., Washington, DC., 2012
- [41] M. Misol, T. Haase, H. P. Monner und M. Sinapius, „Active trim panel with improved sound transmission loss under stochastic acoustic excitation“, in *20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20)*, 2013
- [42] O. Heintze, M. Rose, S. Algermissen, M. Misol, „Development and Experimental Application of a Pre-Design Tool for Active Noise and Vibration Reduction Systems“, *ACTIVE2009*, Ottawa, Kanada, 2009
- [43] F. J. Fahy und P. Gardonio, *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Academic press, 2007
- [44] S. Algermissen, S. Meyer, C. Appel und H. P. Monner, „Experimental synthesis of sound pressure fields for active structural acoustic control testing“, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 140 (7), 881–889, 2014
- [45] S. Johansson, P. Sjösten, S. Nordebo und I. Claesson, „Comparison of multiple-and single-reference mimo active noise control approaches using data measured in a dornier 328 aircraft“, *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 5 (2), 77–88, 2000